

# 中国科研信息化蓝皮书

China's e-Science Blue Book **2017**

中国科学院  
国家互联网信息办公室  
中华人民共和国教育部  
中华人民共和国科学技术部  
中国社会科学院  
国家自然科学基金委员会  
中国农业科学院

编

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 · BEIJING

## 内 容 简 介

本书由中国科学院联合国家互联网信息办公室、中华人民共和国教育部、中华人民共和国科学技术部、中国社会科学院、国家自然科学基金委员会、中国农业科学院共同编撰而成，旨在系统地展示中国科研信息化的整体发展情况，有力地推动中国科研信息化的发展进程。本书邀请了国内外科研信息化领域的权威专家、学者撰稿，围绕科研信息化主题，以面向世界科技前沿、面向国家重大需求、面向国民经济主战场为主线，重点总结了过去两年间我国科研信息化的重大成果、成功经验和典型案例，力求推动科技创新与模式创新的转变，为中国未来科技创新提供全局性、战略性的参考，向国内外读者展示中国科研信息化的全貌和前沿成果。

本书可作为政府部门、科研机构、高等院校和相关企业进行科技战略决策的参考书，也可供国内外专家、学者研究参考。

未经许可，不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。  
版权所有，侵权必究。

## 图书在版编目（CIP）数据

中国科研信息化蓝皮书. 2017/中国科学院等编. —北京：电子工业出版社，2018.6  
ISBN 978-7-121-34280-6

I. ①中… II. ①中… III. ①信息技术—应用—科学研究工作—研究报告—中国—2017  
IV. ①G322-39

中国版本图书馆CIP数据核字（2018）第107750号

策划编辑：徐蔷薇

责任编辑：徐蔷薇 文字编辑：赵 娜

印 刷：

装 订：

出版发行：电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编：100036

开 本：787×1 092 1/16 印张：23.25 字数：566千字

版 次：2018年6月第1版

印 次：2018年6月第1次印刷

定 价：268.00元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题，请向购买书店调换。若书店售缺，请与本社发行部联系，联系及邮购电话：（010）88254888，88258888。

质量投诉请发邮件至 [zltz@phei.com.cn](mailto:zltz@phei.com.cn)，盗版侵权举报请发邮件至 [dbqq@phei.com.cn](mailto:dbqq@phei.com.cn)。

本书咨询联系方式：[xuqw@phei.com.cn](mailto:xuqw@phei.com.cn)。



# 《中国科研信息化蓝皮书 2017》

## 编写委员会

主 任：李树深

副主任：（以联合编纂单位为序）

乔均录      王树志      秦 海

雷朝滋      胡少华      钟 君

张兆田      廖方宇

成 员：（以姓氏汉语拼音为序）

陈明奇      褚大伟      顾蓓蓓

洪学海      李 东      廖毅敏

刘晓东      孙 坦      王 骁

许海燕      张 京      张志琦



## 序 言

2018年4月，习近平总书记在全国网络安全和信息化工作会议上强调指出，信息化为中华民族带来了千载难逢的机遇，我们必须敏锐地抓住信息化发展的历史机遇，推动信息领域核心技术突破，发挥信息化对经济社会发展的引领作用。习近平总书记的重要讲话科学地分析了信息化变革给我们带来的机遇和挑战，是指导新时代网络安全和信息化发展的纲领性文件，是我们做好网络安全和信息化工作的行动指南。

科研信息化是网络安全和信息化建设的重要组成部分。科研信息化是指利用信息化的技术和方法辅助科学研究，其实质是科研生产关系的信息化，其目标是依靠信息化手段来优化创新要素配置，加快科技生产力的改造和升级。随着移动互联网、物联网、云计算、大数据等新一代信息通信技术和人工智能技术的蓬勃发展和广泛应用，推动科研范式向数据驱动型转变，科研信息化的作用也越来越凸显。

当前，世界各国都高度重视科研信息化建设。美国、欧盟等发达国家和地区，将推进科研信息化作为提升创新能力和国际竞争力的战略举措，投入巨额资金提升科研信息化应用水平。2016年7月，《国家信息化发展战略纲要》首次提出要“加快科研信息化”，并将其作为创新公共服务、保障和改善民生的关键一环，纳入国家信息化总体发展战略，标志着我国科研信息化工作进入了新阶段。

科研信息化是建设世界科技强国的重要支撑，为实现新时期我国科研信息化的跨越式发展，我们要进一步强化前瞻布局，牢牢把握我国科研信息化发展的科学路径。要针对短板问题，扎实筑牢我国科研信息化基础设施，要构建共享发展机制，不断释放数字创新资源的共享红利，要瞄准科技创新需求，坚持通过科研信息化手段提升创新效率。

作为国家战略科技力量，中国科学院高度重视科研信息化工作。经过多个五年计划的持续建设，中国科学院已经成为国家科研信息化工作的骨干和引领力量。在科研信息化基础设施建设、资源共享、科研信息化应用及科研模式转变等方面起到了示范作用。2016年，中国科学院首次获得了国际高性能计算领域最高奖项——“戈登·贝尔”奖，2017年设立战略性先导科技专项“地球科学大数据工程”，2018年“中国科技云”门户正式上线，成为我国首个专有科技云。这些代表性工程和成果推动中国科学院科研信息化工作不断迈上新台阶。

当前，中国科学院正在加快制定面向2035的科研信息化发展规划，目标就是建设

国家级科技创新基础平台，全面提升科技创新能力，加速我国产生若干个具有世界领先水平的重大科学发现与原创技术突破。为全面反映近两年我国科研信息化的新态势、新进展和新成果，并指导未来科研信息化发展，在以往工作的基础上，我们继续联合国家有关部门，邀请业界权威专家，围绕科研信息化主题，以面向世界科技前沿、面向国家重大需求、面向国民经济主战场为主线，收录了 26 篇科研信息化文章，形成《中国科研信息化蓝皮书 2017》。本书有比较广泛的代表性，可供科研领域、信息化领域的广大参与者和读者参考，希望能对推动我国科研信息化工作有所助益。



中国科学院院长

2018 年 5 月 6 日

# 目 录

## 序言

中国科研信息化发展重点综述 .....《中国科研信息化蓝皮书》编写委员会 (1)

## 第一篇 面向世界科技前沿篇.....(13)

互联网发展态势与展望 .....吴建平 等 (15)

“天眼”等天文学重大科技基础设施的信息化需求与建设现状 .....崔辰州 等 (25)

空间科学卫星计划的科研信息化应用 .....邹自明 等 (46)

南极巡天望远镜 AST3 在引力波电磁对应体探测中的应用.....王力帆 (62)

我国首次获得“戈登·贝尔”奖的超级计算重大应用——千万核

可扩展大气动力学全隐式模拟 .....杨 超 等 (89)

中国人工智能的科研现状分析与展望 .....唐 杰 等 (96)

What is the European Cloud Initiative.....Cristina Martinez 等 (115)

## 第二篇 面向国家重大需求篇.....(123)

国家科技管理信息系统建设与应用 .....胡少华 等 (125)

中国科技云现状与展望 .....李 俊 等 (139)

“蛟龙”号载人潜水器声学系统的现状及展望 .....朱 敏 (149)

虚拟核电站与核安全的综合模拟仿真 .....吴宜灿 等 (162)

北斗卫星时间系统的建设与应用 .....董绍武 等 (177)

开放科学数据 加速科技创新 .....黎建辉 等 (191)

地理信息大数据的高效获取——国产三线阵立体航摄系统 .....郑丽娜 等 (206)

反应堆数值装置原型系统现状与展望 .....杨 文 等 (216)

信息化助力国家自然科学基金, 实现精准管理与开放共享 .....李 东 等 (239)

“国家哲学社会科学文献中心”建设与展望 .....王 岚 (250)

中国科技云安全保障技术现状与展望 .....	龙 春 等 (255)
------------------------	-------------

### 第三篇 面向国民经济主战场篇.....(261)

中国农业科学院科技云基础架构设计 .....	郑火国 等 (263)
------------------------	-------------

#### 农业经济空间信息服务关键技术与应用平台——中国农业经济

电子地图 .....	刘升平 (273)
------------	-----------

面向先进制造业的标识服务技术发展展望 .....	田 野 等 (286)
--------------------------	-------------

面向复杂设备设施装配和维保的增强现实辅助技术 .....	徐浩煜 等 (297)
------------------------------	-------------

大数据支撑的临床肿瘤学研究 .....	徐瑞华 (310)
---------------------	-----------

信息技术在医学超声工程领域的应用 .....	陈思平 等 (329)
------------------------	-------------

信息化在重大科研仪器研制项目研究与管理中的应用 .....	陆亚林 等 (342)
-------------------------------	-------------

“中国教育和科研计算机网”发展现状与展望 .....	刘 莹 (355)
----------------------------	-----------

后记 .....	(363)
----------	-------

## 中国科研信息化发展重点综述

《中国科研信息化蓝皮书》编写委员会

### 摘 要

过去两年间,国内专家学者对中国科研信息化的发展进行了大量的研究,并取得了一系列重大科技成果。本文主要从面向世界科技前沿、面向国家重大需求以及面向国民经济主战场三个方面对中国科研信息化的进展进行了较为系统的概述,以期为广大科研信息化工作者在该领域的进一步研究提供阅读参考。

### 关键词

科研信息化;世界科技前沿;国家重大需求;国民经济主战场

### Abstract

Over the past two years, the domestic experts and scholars had completed a lot of research on the development of Chinese scientific information and technology, and received a series of outstanding achievements. This article mainly summarized the frontline of science and technology over the world, the major needs of the country and the main battlefield in national economic systematically, so as to provide a reference for the workers in this field for the further e-Science research.

### Keywords

e-Science; The Frontier of Science and Technology in the world; National Major Needs; National Economic Main Battlefield

## 1 引言

“十三五”期间,中共中央办公厅、国务院办公厅印发的《国家信息化发展战略纲要》<sup>[1]</sup>强调,要围绕“五位一体”总体布局和“四个全面”战略布局,以信息化驱动现代化为主线,着力提高信息化应用水平。

2017年10月,习近平总书记在中国共产党第十九次全国代表大会上作了有关《决胜全面建成小康社会 夺取新时代中国特色社会主义伟大胜利》<sup>[2]</sup>的报告,四次提到信息化,再次把信息化工作提升到了新的战略高度,充分展示了党和国家着力发展信息化的坚定决心。科研信息化是推动我国新时代中国特色社会主义发展的一项重要战略举措,是建设创新型国家的强有力保障。

为深入贯彻国家科技政策指导及科技战略规划,切实反映我国重大科研信息化的发展成果及进展态势,同时科学地指导我国科研信息化未来发展,中国科学院继续联合国家有关部门,出版发行《中国科研信息化蓝皮书2017》。本书每两年发布一次,今年已是第四次面向社会公开发行,是一本全面介绍我国科研信息化发展态势及成果的研究报

告，具有典型的代表性和高度的权威性。本书收录了过去两年间在科研信息化应用中取得的重大科技成果，以期对各方均有所裨益。

## 2 概述

科技创新既要“顶天”，面向世界科技前沿，致力于未来发展；又要“立地”，面向国家战略需求，赢得战略主动；同时还要“惠民”，面向经济发展主战场，为人民创造更多财富。坚持“三个面向”<sup>[3]</sup>，加快各领域科技创新，世界科技强国的建设才能行走在正确而宽广的道路上。

《中国科研信息化蓝皮书 2017》共收录文章 26 篇，从“三个面向”的角度出发，侧重于从我国科研信息化发展态势及重大科技成果等方面总结归纳了过去两年间中国科研信息化的主要进展。

### 2.1 面向世界科技前沿篇

“虽有智慧，不如乘势。”加快科技创新，建设世界科技强国，必须审时度势，面向世界科技前沿，开展前瞻性的研究，加强对有望成为今后主流科技的研究和开发。习近平总书记指出：“我国科技界要坚定创新自信，坚定敢为天下先的志向，在独创独有上下功夫，勇于挑战最前沿的科学问题，提出更多原创理论，作出更多原创发现，力争在重要科技领域实现跨越发展，跟上甚至引领世界科技发展新方向，掌握新一轮全球科技竞争的战略主动。”

伴随创新驱动发展战略的大力实施，我国创新型国家建设成果丰硕，“天眼”、引力波探测、空间科学卫星系统、千万核可扩展大气动力学全隐式模拟等多项面向世界科技前沿的重大科技成果<sup>[4]</sup>相继问世。在“第一篇 面向世界科技前沿篇”中，共收录文章 7 篇，主要对科研信息化中重大科技成果及研究进展进行了详细阐述。

本文从中摘选文章 5 篇。

#### 1. 互联网发展成就举世瞩目，体系结构和关键技术经历飞跃变革

在中国工程院院士、清华大学计算机系主任吴建平撰文的《互联网发展态势与展望》中，读者可以了解到互联网经过了半个世纪的高速发展和演化已取得很多令人瞩目的成就，在当前多网一体化互联融合的发展态势下，网络体系结构和关键技术正处于变革的关键时期，该篇文章对互联网当前发展态势和呈现的主要特征进行了分析，从研究和实践的角度分别对国内外互联网体系结构和关键技术的发展进行了总结，为我国互联网的未来发展提出了一体化、高性能、安全可信和智能化等建议。

#### 2. “天眼”等天文学重大信息化基础设施建成并投入使用

在由中国科学院国家天文台信息与计算中心主任崔辰州撰写的《“天眼”等天文学重大科技基础设施的信息化需求与建设现状》一文中，读者可以了解到随着科学技术的发展，天文学研究已经进入数据密集型科学发现的时代。无论是重大天文科技基础设施，还是一般的天文课题研究，都离不开信息化基础设施的支持。本文以 500 米



球面射电望远镜（FAST，见图1）、郭守敬望远镜（LAMOST）、明安图太阳射电日像仪（MUSER）、中法天文卫星 SVOM/ 地面大视场光学望远镜阵（GWAC）、平方千米天线阵（SKA）这5个有代表性的重大天文科技计划为例介绍重大天文科技计划对信息化基础设施的需求和建设情况，同时介绍中国虚拟天文台作为国内天文科研信息化公共支撑平台的建设历程和应用，最后对我国天文科研信息化基础设施的发展提出建议。



图1 被誉为“中国天眼”的500米球面射电望远镜

### 3. 信息系统助力我国空间科学研究进入世界前列

“空间科学战略性先导科技专项”系列卫星计划开启了我国空间科学事业蓬勃发展的新时代，为空间科学先导专项（一期）成功发射的暗物质粒子探测卫星（“悟空”）、“实践十号”返回式科学实验卫星（SJ-10）、量子科学实验卫星（“墨子”，见图2）和硬X射线调制望远镜卫星（“慧眼”）4个科学卫星计划的成功实施提供了坚实的基础设施支撑和系统平台保障服务，使得我国空间科学研究进入世界前列。《空间科学卫星计划的科研信息化应用》一文由中国科学院国家空间科学中心副主任、空间科学先导专项科学卫星工程地面支撑系统总指挥兼总设计师邹自明撰稿。该文首先分析了新时代环境下空间科学科研信息化的需求、机遇和挑战，然后以我国“十二五”科研信息化专项——“空间科学科技领域云”项目建设实践为例证，对其建设历程、体系结构和建设成果进行介绍，详细描述了项目建成的系统平台——日地空系统研究网络在卫星任务协同论证、卫星在轨运行支持和科学研究支撑上的应用示范和服务成效。确立了未来空间科学科研信息化的发展方向，聚焦于提升科研信息化核心要素的水平和能力，建立深度融合、泛在化的云端空间科学科研信息化应用平台。



图2 “墨子”量子通信实验示意图

#### 4. 自主研发全自动“巡天”望远镜为取得引力波重大观测成果提供有力数据支撑

紫金山天文台和中国科学院南极天文中心牵头的中国南极天文合作团队，利用南极极夜极佳的观测条件，自主研发了南极巡天望远镜 AST3，实现了在极寒条件下持续高可靠性的远程全自动巡天观测，这是南极独一无二的首台全自动巡天观测望远镜，并利用自主研发的信息化定制软件进行数据处理，同时合作开发了 AST3 运行及数据处理辅助软件系统，积极为开展包括引力波源、快速射电暴、伽马射线暴、超新星、系外行星等一系列时域天文的前沿观测研究提供信息化软件支撑，成功实现了对首例双中子星合并引力波源 GW170817 光学对应体 AT2017gfo/SSS17a 的观测（见图 3）。该项重大观测成果在中国科学院紫金山天文台南极天文研究中心主任王力帆撰稿的《南极巡天望远镜 AST3 在引力波电磁对应体探测中的应用》一文中进行了详细的阐述。

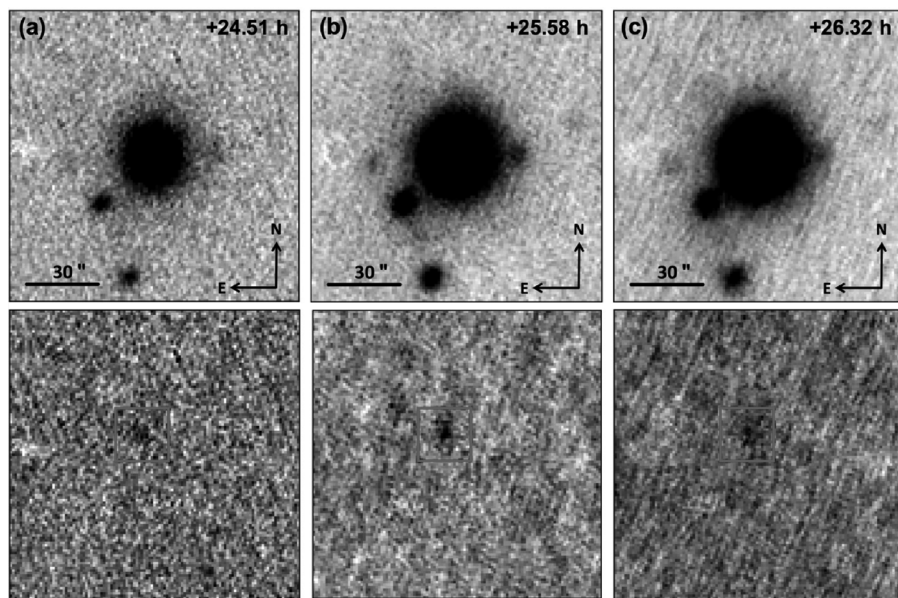


图3 成功观测第一例来自引力波事件 GW170817 的光学对应体 AT2017gfo/SSS17a

### 5. 我国首获高性能计算应用领域最高奖——“戈登·贝尔”奖

美国计算机学会“戈登·贝尔”奖（ACM Gordon Bell Prize）设立于1987年，由高性能计算先驱——戈登·贝尔（Gordon Bell）先生发起，每年颁发一次，表彰世界范围内高性能计算的杰出成就，特别强调奖励高性能计算应用于科学、工程和大型数据分析领域的创新。

2016年11月，“千万核可扩展全球大气动力学全隐式模拟”重大应用成果首获高性能计算应用领域最高奖——“戈登·贝尔”奖（见图4），实现了该奖创办30年来我国在此项大奖上零的突破，打破了西方国家对该奖的垄断，成为我国高性能计算应用发展的一个新的里程碑。由中国科学院软件研究所杨超研究员撰写的《我国首次获得“戈登·贝尔”奖的超级计算重大应用——千万核可扩展大气动力学全隐式模拟》一文，主要阐述了如何突破异构众核极大规模并行环境下隐式求解器设计的难题，深入开展显式、隐式求解器的比较性研究。该项科学研究应用于非静力大气动力学模拟，并在“神威·太湖之光”高性能计算机系统中取得了具有高影响力的研究成果。



图4 “戈登·贝尔”奖颁奖现场

## 2.2 面向国家重大需求篇

当前，国家对战略科技支撑的需求比以往任何时期都更加迫切。科技创新必须把国家重大战略需求放在首位，为国家发展和民族复兴作出卓越贡献。习近平总书记指出：“党中央已经确定了我国科技面向2030年的长远战略，决定实施一批重大科技项目和工程，要加快推进围绕国家重大战略需求，着力攻破关键核心技术，抢占事关长远和全局的科技战略制高点。”

在“第二篇 面向国家重大需求篇”中，本书共收录文章11篇，主要对重大关键核心技术在科研信息化中的应用和科研信息化发展趋势分析等进行了详细阐述。



其中,有关重大关键核心技术的文章包括《“蛟龙”号载人潜水器声学系统的现状及展望》《北斗卫星时间系统的建设与应用》《虚拟核电站与核安全的综合模拟仿真》《地理信息大数据的高效获取——国产三线阵立体航摄系统》等。

围绕国家战略需求,汇总我国科研信息化发展趋势及典型案例,包括《国家科技管理信息系统建设与应用》《中国科技云现状与展望》《信息化助力国家自然科学基金,实现精准管理与开放共享》《“国家哲学社会科学文献中心”建设与展望》《开放科学数据 加速科技创新》《中国科技云安全保障技术现状与展望》等。

本文从中摘选文章 7 篇。

### 1. “蛟龙”号载人潜水器标志着我国跻身载人深潜先进国家行列

中国科学院声学研究所海洋声学技术中心主任、“蛟龙”号载人潜水器(见图 5)副总设计师朱敏在《“蛟龙”号载人潜水器声学系统的现状及展望》一文中指出,深海蕴藏着人类社会可持续发展的战略资源,是事关国家安全发展的战略空间,更是大国博弈的重要战场。掌握深海关键技术是我国进入深海、研究深海、开发深海、确保深海安全的必由之路。“蛟龙”号的声学系统在水声通信(见图 6)和探测功能上实现了突破,是国际载人潜水器技术领域发展的一个亮点。

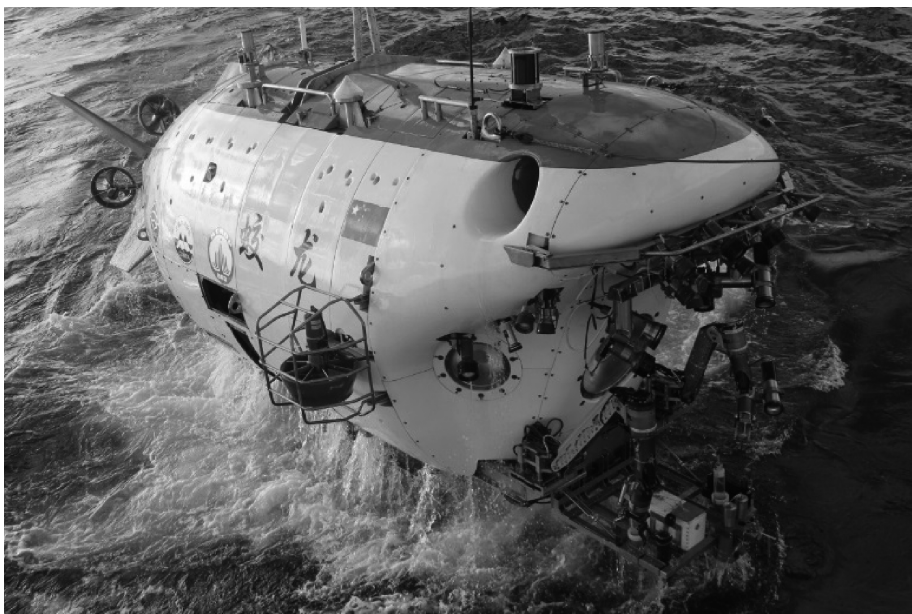


图 5 “蛟龙”号载人潜水器

### 2. 北斗卫星导航系统满足“一带一路”发展需求,旨在为全球提供服务

中国科学院国家授时中心时频基准实验室主任、首席研究员董绍武在《北斗卫星时间系统的建设与应用》一文中指出,在建的我国北斗全球卫星导航系统(见图 7),目前已经具备了亚太地区的导航定位和精密授时功能。预计 2020 年将建成包括 35 颗卫星的全球系统,实现全球覆盖。该文章简要介绍了我国北斗导航卫星系统的时间系统、基

于北斗的国际时间比对和合作、与国际标准时间 UTC 时间的关系以及我国时间工作的最新进展。



图 6 “蛟龙”号通过水声通信机与天宫一号进行海天对话

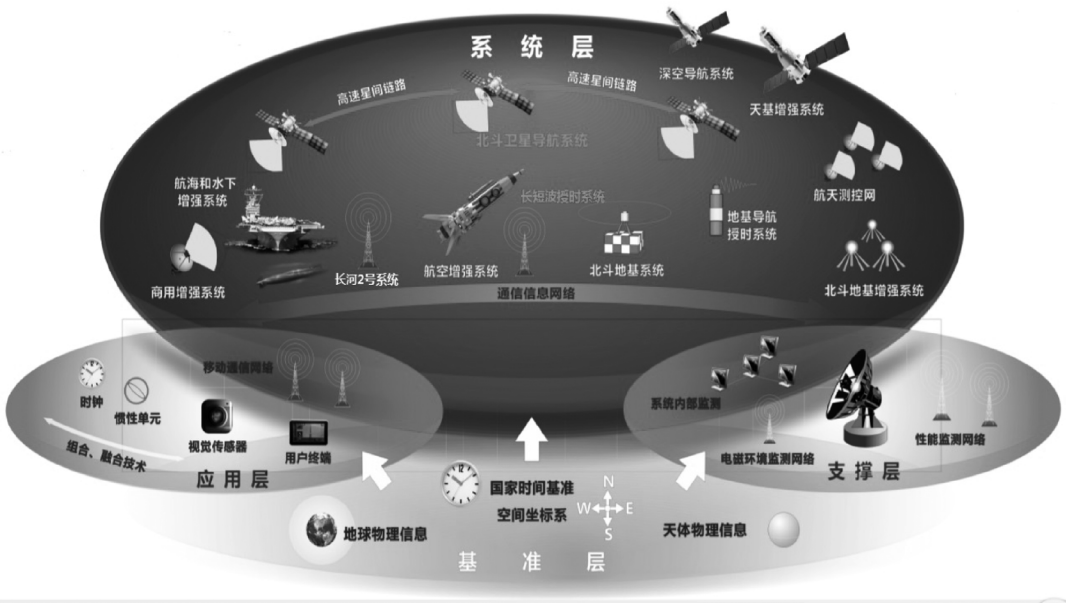


图 7 天地一体信息化授时体系

3. 先进核能研究继续引领国际前沿

核能发展过程中面临着放射性安全问题，历史的惨痛教训告诉人们核能的发展必须以安全为前提，研发安全高效核能系统势在必行。中国科学院核能安全技术研究所 FDS 团队将核科学与信息科学深度融合，首次提出“核信息学”概念，研发了与数字环境和

数字社会充分融合的虚拟核电站 Virtual4DS，可实现核能系统多工况运行仿真、核事故过程演化以及核应急智能推演与决策的大时空综合仿真，为核能系统创新设计、运行安全以及核应急决策提供了有力支撑（见图 8）。核能安全技术研究所所长、中子输运理论与辐射安全重点实验室主任吴宜灿为本书撰写了一篇有关《虚拟核电站与核安全的综合模拟仿真》的文章，主要对先进核能研究继续引领国际前沿的相关工作进展进行了详细阐述。



图 8 虚拟核电站实验平台

#### 4. 国家科技管理信息系统建设与应用成果显著

为深入实施创新驱动发展战略，国务院开展了系列深化科技体制改革的举措，要求建设完善国家科技管理信息系统（NSTIS），通过统一的信息系统对中央财政科技计划项目（专项、基金等）进行申报、评审、执行、验收、管理。在由中华人民共和国科学技术部信息中心常务副主任胡少华撰写的《国家科技管理信息系统建设与应用》一文中，读者可以深入地了解符合国家科技管理信息系统业务需求的系统业务架构和国家科技管理信息系统的四层系统整体架构。作者深刻剖析了系统的核心功能和关键技术，同时对系统整体建设成效进行全面分析，最后总结了国家科技管理信息系统相关工作，并对未来研究方向进行了展望。

#### 5. 信息化建设助力国家自然科学基金精准管理与开放共享

在国家自然科学基金委委员会信息中心副主任李东撰稿的《信息化助力国家自然科学基金，实现精准管理与开放共享》一文中，着重阐述了科研管理信息化发展的现状，以及国家自然科学基金管理信息化的历史进程与发展战略，并对国家自然科学基金精细化管理平台“科学基金网络信息系统”和共享服务与开放获取平台的建设成效进行了论述和分析。

#### 6. 社会发展与网络安全保障逐步完善

近年来信息技术飞速发展，特别是互联网、大数据、人工智能相关技术的广泛应

用，正在重塑人类社会。以人类社会为研究对象的哲学社会科学的研究方式、方法也逐步发生转变，对哲学社会科学信息化提出了新要求。由中国社会科学院图书馆党委书记、馆长王岚撰稿的《“国家哲学社会科学文献中心”建设与展望》一文回顾了中国社会科学院近年来对信息化的实践探索，分析了哲学社会科学信息化面临的挑战，并对此提出全面加快建设国家哲学社会科学文献中心的策略。

此外，由中国科学院计算机网络信息中心网络空间安全技术与应用发展部主任龙春撰稿的《中国科技云安全保障技术现状与展望》一文指出，中国科技云是承载中国科研信息化高速发展的重要基础设施，中国科技云安全保障是中国科学院“十三五”信息化专项安全工程体系建设的重要组成部分，其目标为构建云计算环境融合安全保障体系，为科研生产活动提供多维、高精度的网络信息安全保障。该篇文章总体介绍了中国科技云安全保障技术现状以及支撑情况，并讨论了安全保障技术在云计算环境下的特点以及下一步发展方向。

### 2.3 面向国民经济主战场篇

“穷理以致其知，反躬以践其实。”科技要发展，必须要使用。科技水平已经成为影响世界经济周期最主要的变量之一，也是决定经济总量提升的最主要因素。每一次科技革命都会扩大经济总量，为经济发展带来一个黄金发展期。加快科技创新，为经济发展注入新动力，为实现经济社会协调发展提供有力保障，是保持我国经济持续健康发展的必然选择。因此，要面向经济主战场，推动科技和经济社会发展的深度融合，打通从科技强到产业强、经济强、国家强的通道。

在“第三篇 面向国民经济主战场篇”中，共收录文章8篇，主要对科技创新推动国民经济及网络安全保障的农业、工业、医疗、教育等重要方面进行了详细阐述，包括《农业经济空间信息服务关键技术与应用平台——中国农业经济电子地图》《中国农业科学院科技云基础架构设计》《面向先进制造业的标识服务技术发展及展望》《面向复杂设备设施装配和维保的增强现实辅助技术》《大数据支撑的临床肿瘤学研究》《信息技术在医学超声工程领域的应用》《信息化在重大科研仪器研制项目研究与管理中的应用》《“中国教育和科研计算机网”发展现状与展望》。

本文从中摘选文章4篇。

#### 1. 农业信息化建设创新大力驱动农业经济发展

由中国农业科学院农业信息研究所智能农业技术研究室副主任刘升平撰稿的《农业经济空间信息服务关键技术与应用平台——中国农业经济电子地图》一文中指出，经过30多年的信息积累与潜心研究，目前已建立我国最大的分县农村经济基础资料数据库，以研究农业经济数据管理、分析、决策服务为主线，开展了长期跨学科、跨部门的技术开发与应用，从数据管理、信息分析和决策服务三个方面开展研究工作，为各级农业决策部门、科研单位、农业生产部门等提供了卓有成效的信息服务，促进了农业与社会、经济、环境协调发展，对实现我国农业和农村信息化发展起到了积极的推动作用。



## 2. 智能工业信息化发展成效显著

发展先进制造业，是目前各国制造业应对经济全球化，提高国际竞争力的迫切需求，同时也是以信息化带动工业化、促进传统制造业结构调整和优化升级的必然选择。先进制造业的实现必须以信息的互联互通为前提，特别是跨领域、多环节的应用之间互联互通和关联映射。但是，由于在先进制造业中各种异构标识的存在，致使各个应用环节之间形成了一个信息孤岛，且各种异构标识的长期共存是未来发展的常态。由中国科学院计算机网络信息中心物联网信息技术与应用实验室常务副主任田野撰稿的《面向先进制造业的标识服务技术发展展望》一文详细介绍了在先进制造业各领域，如原材料供应链管理、个性化定制、网络化协同、远程运维等各个方面如何构建异构兼容的、多层次、分布式、对等互通的标识服务体系架构（见图9），为先进制造业各种创新模式的发展提供参考。

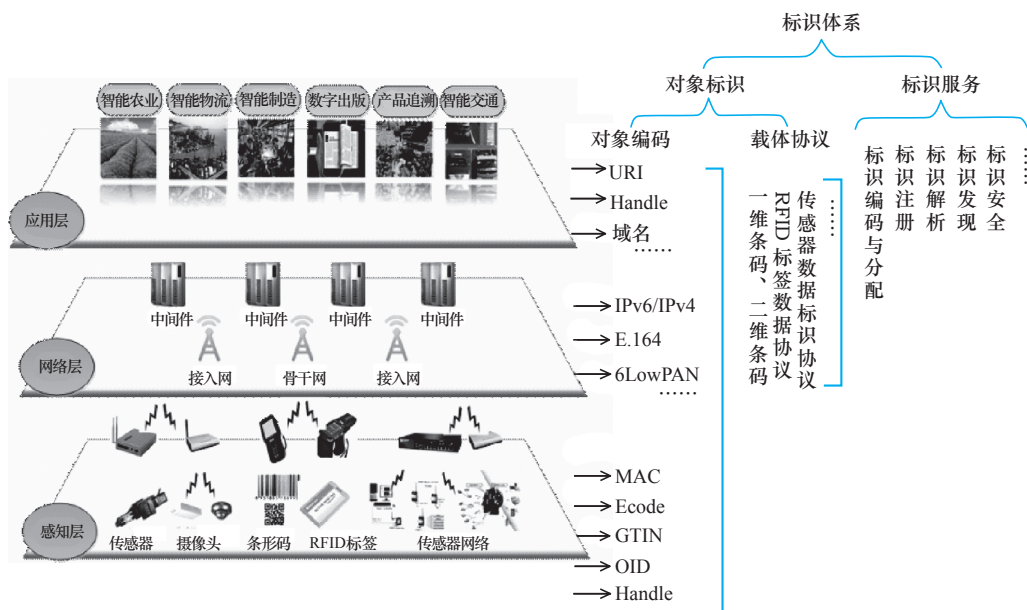


图9 面向先进制造业的标识服务体系图

## 3. 精准医疗的研究与应用已逐步惠及社会民众

中山大学肿瘤防治中心院长、中国抗癌协会肿瘤靶向治疗专业委员会首任主任徐瑞华在《大数据支撑的临床肿瘤学研究》一文中指出，人口健康是最重要的社会民生问题，关乎国家经济发展和社会进步，是各国政府着力解决的问题。我国每年新增的癌症病例多达几百万例，且呈逐年攀升趋势。肿瘤已经成为一种常见疾病，并且逐渐超越心血管、脑血管疾病成为我国居民死因的“头号杀手”。随着大数据和云计算技术的快速发展，大数据在基础医学、临床医学及公共卫生领域的应用正如火如荼（见图10）。该篇文章主要介绍了大数据对肿瘤学发展的重要意义，肿瘤学大数据发展的关键技术以及肿瘤学大数据发展面临的机遇与挑战。



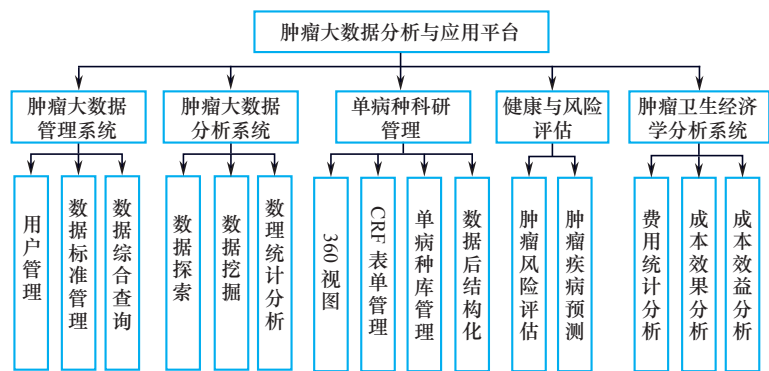


图 10 肿瘤大数据平台的分析与应用系统框架

此外，由深圳大学教授、医学超声关键技术国家地方联合工程实验室主任陈思平撰写的《信息技术在医学超声工程领域的应用》一文中提到，医学超声成像已经成为现代临床医学应用最广泛的诊断手段之一。每一次超声回波隐含信息的发现都促进了医学超声成像技术突破，其发展史就是一部不断发现隐含信息的历史，医学超声从最初一维信息的 A 超扩展到二维图像信息的 B 超以及结合血流运动信息的彩超，正在向早期诊断、精准医疗方向发展。通过超声、电磁与弹性及生化等多元信息协同互补，同时获得了人体组织在解剖结构、力学特性和电学特性上的重要的相关信息，这些多元信息发现对疾病的早期诊断具有重要价值，并已取得较为显著的医疗效果（见图 11）。

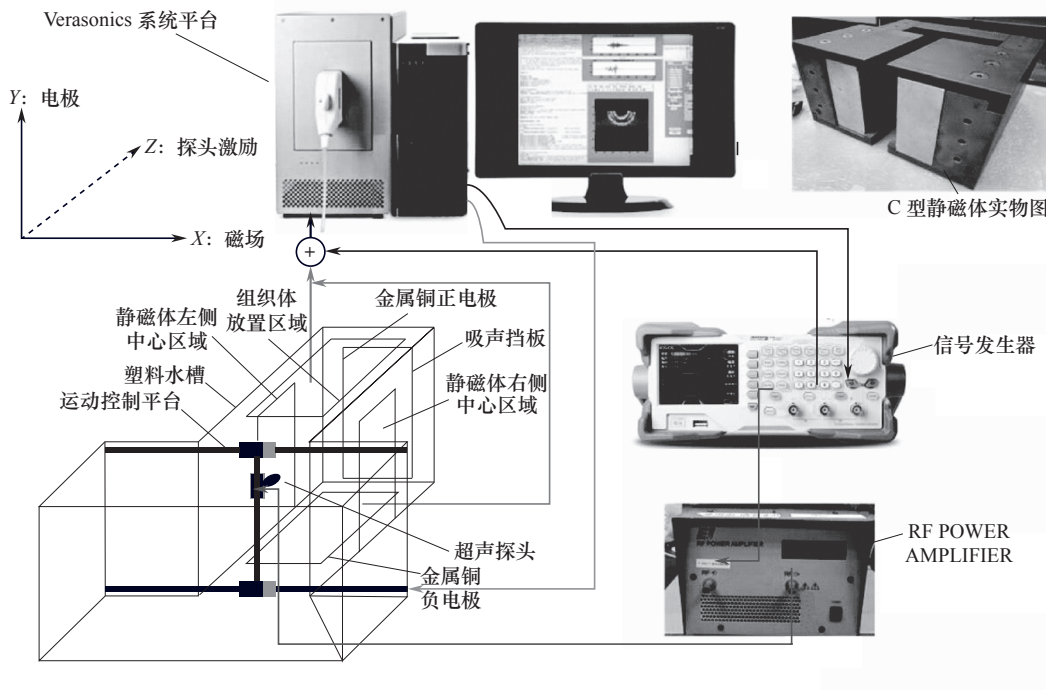


图 11 双模成像实验平台

### 3 总结与展望

科学技术是世界性、时代性的,发展科学技术必须具有全球视野、把握时代脉搏。历史经验表明,科技革命总是能够深刻改变世界发展格局。当今世界,新一轮科技革命蓄势待发,物质结构、宇宙演化、生命起源、意识本质等一些重大科学问题的原创性突破正在开辟新前沿、新方向,一些重大颠覆性技术创新正在创造新产业、新业态,信息技术、生物技术、制造技术、新材料技术、新能源技术广泛渗透到几乎所有领域,带动了以绿色、智能、泛在为特征的群体性重大技术变革,大数据、云计算、移动互联网等新一代信息技术同机器人和智能制造技术相互融合步伐加快,科技创新链条更加灵巧,技术更新和成果转化更加快捷,产业更新换代不断加快,使社会生产和消费从工业化向自动化、智能化转变,社会生产力将再次大提高,劳动生产率将再次大飞跃。

科研信息化<sup>[5]</sup>是新一轮科技革命的引擎和显著特征。面对方兴未艾的信息化浪潮和日益激烈的科技竞争,如果我们忽视科研信息化,不仅会面临信息化高端应用继续落伍的局面,而且意味着很可能在新一轮科技革命中无法抓住创新跨越的历史机遇。为解决当前我国科研信息化发展面临的诸多问题,我们应当抓住当前历史机遇,大力发展科研信息化,促使科研和创新活动向个性化、开放化、网络化、集群化方向发展,不断优化创新生态,变革我国科研和创新组织及活动模式,大幅度提升我国科技创新能力,激发前所未有的创新活力,切实支撑国家创新驱动发展战略。

科研信息化能力的不断提升离不开科学技术的创新驱动发展,《中国科研信息化蓝皮书 2017》在总结过去两年我国重大科研成果的基础上,进一步探讨构建更为完善的科研信息化体系,并以创新的科研思维和研究进展为借鉴,具有高度的前沿性、前瞻性和权威性等特点,相信可以为广大科研工作者提供一定的指导和参考。

#### 参考文献

- [1] 新华社. 中共中央办公厅、国务院办公厅印发《国家信息化发展战略纲要》[EB/OL]. [http://www.gov.cn/xinwen/2016-07/27/content\\_5095297.htm](http://www.gov.cn/xinwen/2016-07/27/content_5095297.htm), 2016-07-27.
- [2] 新华社.《决胜全面建成小康社会 夺取新时代中国特色社会主义伟大胜利》十九大报告全文[EB/OL]. [http://www.sohu.com/a/198676567\\_407270](http://www.sohu.com/a/198676567_407270), 2017-10-18.
- [3] 人民网. 习近平在全国科技创新大会、中国科学院第十八次院士大会和中国工程院第十三次院士大会、中国科学技术协会第九次全国代表大会的重要讲话《科技创新的三大方向》[EB/OL]. <http://politics.people.com.cn/n1/2016/0602/c1001-28406379.html>, 2016-05-30.
- [4] 中国科学院网. 党的十八大以来中国科学院重大科技成果产出情况[EB/OL]. <http://www.cas.cn/zt/sszt/sbdkjcg/>, 2017-09.
- [5] 陈明奇, 褚大伟, 洪学海, 曹凝. 科研信息化发展态势和思考[J]. 中国科学院院刊, 2016, 31(6): 608-613.

第一篇  
面向世界科技前沿篇





## 互联网发展态势与展望

吴建平 徐明伟 杨 荒

(清华大学计算机系)

### 摘 要

本文首先分析了互联网发展的总体态势,接着讨论了新型网络体系结构研究与发展的最新进展,在此基础上对我国互联网发展进行了总结,对未来互联网发展态势做了展望并对我国互联网研究和建设提出了建议。

### 关键词

互联网;网络体系结构;态势分析;发展建议

### Abstract

This paper analysis the overall trend of Internet development, and discusses the research and development effort on new network architectures. Further, the paper summarizes the development trend of Internet in China, and proposes some suggestions on future Internet development.

### Keywords

Internet; Network Architecture; Trend Analysis; Development Suggestion

## 1 引言

历经了半个多世纪的高速发展与演化,互联网核心技术有了长足进步。继20世纪70年代光纤通信技术、80年代互联网技术、90年代移动通信技术、21世纪电信网与互联网融合取得跨越式发展以后,互联网与通信技术目前处于孕育新的突破之前的一个调整期,近期的主要发展模式以演进式发展与螺旋式上升为特征。泛在感知、人工智能和大数据等创新技术的出现正对网络体系结构产生重大影响。

目前,互联网已成为支撑经济繁荣和国家竞争力的基础,并成为人类社会信息共享与协作的基础平台。互联网对科技与社会发展所起到的基础性、渗透性、引领性作用,在今后十年甚至更长的历史阶段无论如何强调也不过分。以互联网支撑的物联网技术的进一步发展,将构造一个人、机、物和谐发展的美好世界,极大地扩展信息技术的应用范围。以互联网支撑的移动互联网应用将成为未来相当长一段时间内,带动信息产业发展的规模性增长点。新型智能手机应用极大地促进了互联网应用的深度与广度,固定通信和移动通信应用业务流量在未来10年将呈现爆发式增长的态势。云计算、互联网、物联网、大数据技术相互融合发展,新型信息产品和服务不断涌现,信息产业、文化产业和社会事业进一步融合发展,民众将享有更加丰富多样、快捷经济的信息和文化服务。深入推进工业化和信息化的融合发展,促进经济结构转型升级,是互联网技术未来

发展肩负的又一项使命。我国将进一步运用互联网技术，推动企业提高经营管理水平，转变生产方式，支撑大众创业、万众创新经济发展新模式，应对经济发展新常态；加强产品创新，降低能源资源消耗，促进制造业向更高层次迈进；以互联网技术促进现代服务业发展和就业水平的提高，提升服务业比重和水平，推动经济结构的战略性调整。

今天，互联网已经发展成为继陆、海、空、天之后人类的第五疆域——网络空间（Cyberspace）。互联网、移动通信网络、广播电视网、空间信息网络、海洋网络、工业互联网、能源互联网、物联网等多种网络融合需求逐渐显现出来。一体化融合网络规模庞大、异构复杂、业务种类繁多、网络伸缩性强、时空跨度大，网络拓扑结构不断变化。虽然当前各种网络本身还呈现“烟囱式”的发展模式，系统相对独立、专用，缺少统一的网络体系结构和协议规范，但是网络发展已经显现出了互联互通、网络融合的态势。

## 2 互联网发展态势分析

自 2010 年以来，互联网与通信技术发展的基本特征和总体态势包括以下方面。

（1）从 IPv4 到 IPv6 仍然是支撑未来 10 年全球互联网的主体体系结构，但互联网和下一代互联网的发展所面临的可扩展性、安全性、实时性、可管理性等重大技术挑战逐渐显现出来。

（2）互联网的快速发展使其与其他网络，如移动通信网络、空间网络等相互渗透，趋向于最终融合为一种空、天、地、海一体化的网络体系结构。同时，随着互联网与传统行业深度融合发展，互联网+、工业 4.0 等成为国民经济命脉领域的新支柱，对新型网络业务在可靠性、实时性、服务等级等方面提出了一系列新的挑战，迫切需要技术先进、自主可控、安全可信、军民融合的网络体系与核心设备。

（3）互联网流量飞速增长、信息冗余传输严重，网络拓扑结构、流量分布特征呈现变化，网络提供商与内容服务商之间的高效适配问题日益突出，以“内容为中心”的未来媒体宽带融合网成为发展趋势；“交换即计算，计算即交换”将衍生出网络的“IT 化”和“云化”，以及 SDN/NFV 等新兴网络技术，并带来网络体系结构演进、设备形态变化和组网运营模式变革。

（4）由于传统网络结构不灵活，数据中心的广泛应用与部署、亿级海量设备与移动终端接入及异构融合、服务质量保障需求进一步提升，均使网络可持续发展问题日益严峻，探索安全可重构、高效可扩展、开放可定义的未来网络体系结构成为业界关注的重要方向。

（5）宽带通信技术的核心器件和光网络创新推动传输速率、容量和距离的持续提升，网络传输容量是衡量网络承载能力和水平的关键性指标。数字媒体流量的猛增需要 P 比特级传输、E 比特级交换、万兆光接入、传输 IP 化、软定义光网络、数据中心全光互连、光子集成、光电集成等技术的革新，以及十年网络速度至少提升 1 000 倍的带宽扩容。2018 年全球 IP 流量是 2013 年的 4 倍，高峰期流量将达到 1 Pb/s，其中 80% 以上是视频流量。100Gb/s 光传输技术已规模商用，400Gb/s 已开始标准化并出现样机，



下一代 T 比特级速率 100T 单模单纤 WDM 已实现。

(6) 软件定义化、虚拟化和通信资源开放正越来越多地受到业界重视。互联网网络功能可以利用标准的大容量服务器、存储和交换机以虚拟化方式实现,形成云化体系,有效提高网络资源利用率,降低维护成本,加快业务部署。

(7) 光电子成为宽带通信核心器件:光子集成技术将大幅度降低器件体积和连接损耗,是解决现有光通信网络中速率与能耗问题的最佳方案。硅光集成、InP 基光子集成、集成光波导(铌酸锂、光纤器件、有机)以及混合集成成为未来发展的重要前沿方向。

(8) 4G 之后的无线移动通信研究成为全球研究热点。5G 将于 2020 年商用,满足移动互联网业务未来十年网络速度提升 1 000 倍的需求。5G 以及 5G 之后的未来移动通信基础理论与关键技术孕育突破,体系构架面临变革。未来移动通信将更加注重用户的需求,为用户带来全新的体验。移动交互式游戏、3D、虚拟现实及全息图像等新型移动业务应用将被纳入未来移动通信系统的技术需求;业界还试图将未来移动通信的应用范围从目前的人与人通信拓展至人机物协同通信、超密集连接物联网、车联网以及工业互联网等更为广泛的领域。未来移动通信系统的业务应用将迈上新的台阶,从而更为深刻地改变人类社会的运行方式。

(9) 以 WiFi 为代表的宽带无线接入技术在世界范围内蓬勃发展,在 802.11 体系中,传统的无线局域网技术在向着更大带宽、更高速率方向发展,同时衍生出诸多新的应用方向,包括支持物联网应用的 802.11ah,支持车联网的 802.11p,支持低时延大带宽的 802.11ad 等。此外,WiFi 技术也在考虑组网、漫游支持语音等功能。

### 3 新型网络体系结构研究国际发展状况

互联网的发展已经进入了理论和技术变革的关键时期,互联网体系结构是互联网发展的最核心要素。总体上看,互联网体系结构发展分为革命式和传统演进式两条路线。革命式路线是一种全新的体系结构,需要对互联网体系结构进行全新设计,这种方法脱离实际,部署代价较高;传统演进式路线是对当前体系结构进行打补丁式的增量更新,但很难从根本上解决问题。立足于互联网发展的现实情况,充分发挥其固有的技术优势,增强互联网对未来应用的支持能力,实现互联网创新演进式发展,这样的技术思路不仅保持了互联网核心和设计原则相对稳定,而且能够通过适当改变约束其扩展的基本要求,更高效地支持创新应用。

#### 3.1 美国相关研究情况

美国于 2005 年启动 FIND (Future Internet Design) 计划,随后在 2006 年开始了与之相辅相成的 GENI (Global Environment for Network Innovations) 计划,为未来网络研发提供了试验环境。截至 2012 年,GENI 已经完成了管控架构及新的端到端工作原型的开发、整合和试运行,目前进入了其第五轮计划进程。在 FIND 等计划的初步方向性探索的基础上,2010 年美国 NSF 又启动了 FIA (Future Internet Architecture) 计划,开始进一步设计和验证未来互联网的综合新型体系结构,其中包括 MobilityFirst、NDN、

NEBULA、XIA、ChoiceNet 等项目, 这些项目试图在内容路由、移动性、可演进性等方面“物化”未来网络的可能形态, 取得了一定的进展。在对已取得的进展回顾分析后, 2014 年美国 NSF 进一步明确了工作方向, 启动了 FIA 第二阶段, 以信息元网络、可扩展网络体系结构、网络移动性和云计算作为其重点, 旨在进一步探索未来网络基础理论和方法。典型的项目及各自的主要特点如下。

(1) MobilityFirst。MobilityFirst 的目标是应对移动设备的普及和大规模无线接入的挑战, 实现平滑无缝的移动性支持。MobilityFirst 将网络节点的移动当成一种常态, 而不是一种特殊连接形式, 使用“全面延迟容忍网络”(GDTN) 技术实现移动节点的通信稳定性, 并关注移动性和可扩展性的平衡, 以及通过合理调度网络资源来实现移动节点的高效通信。

(2) NDN (Named Data Networking)。NDN 采用内容名字 (URL) 取代 IP 地址作为内容标识, 设计基于内容名字的路由协议, 并在路由节点引入内容缓存机制, 有效减少网络冗余流量和降低源服务器负载, 提高服务质量。同时, 通过内容名字和其所在网络地址的分离, 实现移动性支持; 以及对数据内容本身进行签名和加密, 提升信息安全性。

(3) NEBULA。NEBULA 是一个安全且有弹性的网络体系结构, 采用云计算数据中心完成其数据存储和核心计算。NEBULA 构建了一个高速运行且安全可靠的中枢网络, 以与数据中心进行连接来支持云计算和分布式通信。NEBULA 的技术重点包括新的可信赖的云计算模型数据控制方法、以云计算为中心的网络体系结构等。

(4) XIA (eXpressive Internet Architecture)。XIA 的目标是设计一个可演进和内嵌安全机制的网络体系, 并且不局限于对某一种特定网络场景的支持。XIA 建立在内部安全原则概念基础上, 允许应用业务设定对数据传输的需求, 同时设计安全、高效的传输机制, 以确保该需求能够被有效实现。

(5) ChoiceNet。ChoiceNet 项目利用经济学原理, 指导网络体系结构设计, 使得互联网能够依旧保持在网络核心领域内的创新力。ChoiceNet 在网络设计中进行一项革命性的转变, 将互联网技术创新与经济原则相结合。运用技术博弈和经济激励构建竞争性的网络技术市场, 旨在新一代互联网体系结构的设计和开发等各个方面, 都可以通过这些用户选择和竞争, 推动协议栈所有层的创新和变革。

### 3.2 欧洲相关研究情况

欧盟在第七框架 (FP7) /Horizon 2020 计划下, 从 2008 年开始了旨在突破当前互联网的结构限制、支撑未来网络的融合体系结构的研究, 启动了为未来网络研发提供试验环境的 FIRE (Future Internet Research and Experiment) 计划, 并利用 ITU-T 开始技术标准化工作。我国以 ECIAO (EU China Future Internet Common Activities and Opportunities) 研究课题机制与欧盟的 FIRE 计划进行合作。FIRE 计划中比较典型的项目如下。

(1) PSIRP (Publish-Subscribe Internet Routing Paradigm, 2008—2010 年) 项目是欧盟 FP7 最有影响力的项目之一。它引入 Pub (发布) /Sub (订阅) 通信模式来重新设计互联网体系结构和工作机制, 使多播成为通信的基本范式, 并且从设计之初就充分考



虑安全性与移动性。

(2) PURSUIT (Publish Subscribe Internet Technology, 2010—2013 年) 是 PSIRP 的后继项目。它在 PSIRP 的基础上, 开展了以下创新性工作: 研究缓存在发布订阅互联网体系结构中的角色, 以及对拥塞控制和错误控制的影响; 研究发布订阅架构对底层操作的影响, 包括资源分配与预留等; 研究这种新网络体系结构与底层网络资源如何协同工作, 如光纤资源再分配问题、无线资源绑定问题等; 研究该体系结构对社会经济环境的影响。

### 3.3 其他网络体系结构研究

(1) 软件定义网络 (Software Defined Network, SDN)。SDN 的设计理念是将网络的控制平面与数据转发平面进行分离, 通过一个集中式的控制器实现更加灵活的路由策略, 并通过标准的通信协议实现与路由器 / 交换机的控制交互。SDN 技术使得路由器 / 交换机专注于数据转发, 同时通过控制器实现了灵活的网络控制。该技术能够帮助网络运营商更好地控制基础设施, 降低整体运营成本。

(2) 双结构互联网。针对现有互联网“网络拥堵, 内容难管”等问题, 双结构互联网运用“边缘帮助核心, 存储帮助路由”的研究策略, 将基于推模式 (Push) 的存储广播次结构与基于拉模式 (Pull) 的互联网路由主结构相集成, 形成一种推拉结合的双体系结构网络。双体系结构通过两种结构优势互补、一体化发展, 能够实现网络结构的转型和信息内容的高效协同分发。

## 4 我国互联网发展和研究进展

在网络融合和互联互通这一当前互联网发展的总体态势之下, 我国互联网发展迅速。特别是“十二五”期间, 围绕国家宽带网络建设与发展的总体需求, 国家 863 计划宽带网科技专项“十二五”期间陆续启动了 12 个重大、重点项目, 涉及新型网络体系结构、超大容量超高速光通信、新型高速路由、下一代广播电视网、三网融合演进、IPv6 管控、端到端绿色网络等宽带网络新技术发展的各个方面。围绕宽带网科技重点专项实施, 取得了一系列重要突破。

### 4.1 新型网络技术

在网络发展战略方面, 我国正在开展实施“宽带中国”“中国下一代互联网示范工程”“未来网络重大科技基础设施”等战略, 并开展了“创新 2050: 科技革命与中国的未来”“面向 2030 中国工程科技中长期发展战略研究”“未来网络技术、平台、机制发展战略研究”等战略研究。

在新型网络体系结构与关键技术研发方面, 国家 973 计划、863 计划、自然科学基金委也先后启动了面向未来互联网体系结构的研究计划, 重点支撑了“新一代互联网体系架构与协议研究”“面向服务的未来互联网体系结构与机制研究”“可重构信息通信基础网络体系研究”等课题研究。在上述项目中, 提出了一些新的网络体系结构方案, 如

清华大学的可演进网络体系结构和基于真实地址的安全可信网络体系结构、北京交通大学的一体化普适服务网络、解放军信息工程大学的可重构网络等，这些研究从不同的角度和层次来研究互联网体系结构技术。

在创新网络试验平台方面，我国已开通了覆盖 16 个城市的基于新一代网络体系结构的创新试验设施，在软件定义路由交换设备、云架构信息资源智能调度系统、大数据网络测量感知等方面取得了突破，形成了一系列具备自主知识产权的成果。在网络试验平台方面，国家于 2013 年正式将未来网络重大基础设施（CENI）批准为“十二五”国家十六个重大科学基础设施项目之一。

在互联网核心设备方面，我国拥有华为、中兴等国际龙头企业，网络设备实现了高端化发展，400G 和 T 级路由设备全球领先，整机优势加速向网络芯片和协议软件领域扩展，成为 IETF 国际标准的重要提供者之一，对于 ONF 等新兴国际标准化组织的影响力不断提升。

## 4.2 互联融合

在三网融合演进技术研究方面，完成了万兆 OLT、万兆 ONU 等核心技术开发，集成播控平台已向约 50 万用户提供视频点播服务，NGB-LTE 创新示范区接入网应用示范区已覆盖 20 万用户，FTTH 示范网用户已覆盖 29 万用户，产生了良好的经济与社会效益。在下一代广播电视网（NGB）项目中，发布了《NGB 宽带接入系统 HINOC 传输和媒质接入控制技术规范》等标准，总体架构等成果已应用于全国有线电视网络互联互通平台（广电 136 工程），产生了巨大的经济与社会效益。

移动互联网与宽带网融合研究方面，面向中国 5 ~ 10 年的发展运营需求，提出了网络融合体系结构及未来演进方案，向 ITU 提交了未来网络智能化演进提案 NICE，完成了分布式存储和智能缓存设备等核心设备的开发。

在天地一体化信息网络融合研究方面，完成了融合互联网、移动通信网和空间网络的一体化网络体系结构设计，开展了关键技术攻关，建成了演示示范环境，启动了天地一体化信息网络重大工程实施方案论证。

## 4.3 光通信研发与制造

在光通信研发与制造方面，我国产业制造能力已经位居世界前列，自主产品已占全球光网络的 2/5，占全球光接入的 3/4，占全球光纤光缆的 1/2，但缺乏高端核心技术，高端芯片和精密器材的设计和制造能力不足，高端器件和芯片主要依赖进口。产生这种局面的主要原因包括：技术起步较晚、科研经费投入不足、工艺装备基础设施缺乏，人才团队培养不足，加上国际上近几年把高端器件和芯片进行光电集成，并与高速 ADC/DAC 和 DSP 捆绑的多学科集成趋势。

在新型超大容量全光交换网络研究方面，提出了下一代无色、无阻塞超大容量光交换体系架构，能大幅度改善组网性能，一批核心技术分别被 IETF 和 ITU-T 等国际标准组织所采纳。“十二五”期间，“超高速超大容量超长距离光传输基础研究”“下一代光传输系统中高速、高性能 ADC/DAC 芯片研制和系统验证”“超高速长距离光

传输系统研究与开发”“光子集成技术与系统应用”“新型超大容量全光网络架构及关键技术研究”“支持百 T 千公里标准单模光纤传输的城际干线光传输设备研制及示范”等项目均已得到国家立项支持，均取得了重要的阶段性进展。

#### 4.4 无线移动通信

我国在无线移动通信领域起步较晚，经过近 30 年的奋起直追，我国在这一领域实现了跨越式发展，在国际标准化组织中已经拥有重要话语权，基础研究水平也得到了大幅提升。在“十二五”期间，实施了国家 863 计划 5G 移动通信系统先期研究重大项目，联合国内企业和科研机构与大学，共同提出了 5G 发展愿景，明确了 5G 关键核心技术指标。大部分成果被 ITU 所采纳，在国际上产生了广泛的影响。对 5G 关键技术、系统框架、频率需求、业务应用与场景等进行了较为充分的调研与分析，完成了系列研究报告，为 5G 标准化研究奠定了较为坚实的基础。明确了 5G 移动通信系统研发的核心关键技术和主攻方向，完成了一期系统试验云平台的总体设计，并已付诸实施。该平台是目前所知的规模最大、技术指标最为先进的试验平台，最大可支持 1024 个天线的配置，具备集中式和分布式可重构配置与部署能力，可进行 M-MIMO 和 UDN 关键技术验证，并可支持 SON 和 SDN 网络智能化技术。基于大规模实测数据构建了能够精确体现我国部署环境特征的大规模天线应用场景及三维化大规模化信道与场景模型，对大规模天线系统的理论性能以及能效性能进行了分析验证。华为、中兴、大唐、中国移动等核心企业在 5G 关键技术研发方面走在世界前列，已开始关键技术测试与技术试验。

然而，就目前而言，我国在信息通信技术领域的研究开发整体上仍处于跟踪状态，在核心芯片方面的研发与产业化能力也与国际先进水平差距较大。近年来我国虽然已经具备了光通信、移动通信、网络与交换核心芯片的基本研发能力，但高端芯片市场仍然被西方发达国家所占据。在代表未来通信基础技术发展方向的硅光（SiPh）研发方面，我国产业基础尤为薄弱，极有可能被国外处于领先地位的 Intel 公司和 IBM 公司拉开差距，从而在新一轮产业竞争中处于被动地位。目前信息通信领域的发展正处于新一轮技术与产业变革的初期，以电信运营商为核心的应用模式正在发生深刻的变化，OTT 模式正逐渐成为产业发展的主要驱动力之一，网络设备的硬件平台通用化、分布化、虚拟化正逐渐成为主要潮流，ICT 深度融合的时代即将到来，传统的电信技术产业链将面临巨大的冲击，整个行业正处于技术链和产业链重塑的重要转折期，未来网络通信系统面临巨连接、巨容量、广应用的重大需求，关键技术孕育全新的突破，而体系结构则面临潜在的革命性变革。

## 5 展望与发展建议

### 5.1 一体化融合网络体系结构和关键技术

随着网络空间（Cyberspace）应用领域的不断拓展，互联网、移动通信网络、广播电视网、空间信息网络、海洋网络、工业互联网、能源互联网、物联网等多种异

构网络相互连接、彼此渗透，其融合一体的趋势已经十分明显。然而，当前各种网络系统采用相对独立、专用而非统一的网络体系结构和协议规范，只能借助各种协议网关的转换实现不同网络间的互联融合，由于缺乏网络体系结构的总体设计和指导，网络间互联融合面临可扩展、性能、安全等诸多困境。我们应当把握下一代互联网更新换代的重要机遇，开展一体化融合网络体系结构研究和建设，引领我国未来网络的发展。

网络虚拟化是将网络的硬件基础设施与网络为应用提供的功能相剥离的技术。深度的一体化融合网络将以 IPv6 为基础，通过物理网络基础设施的网络虚拟化技术，支撑不同融合网络的个性化需求。在此基础上，以 IPv6 为核心的互联网及一体化融合网络必将成为社会的泛在基础设施，开展互联网基础行为测量与分析，提供对互联网基础行为分析的可知晓、可解析、可管理是保障一体化融合网络运行的稳定性、高效率和高可靠的必由之路，也是必须自主掌握的技术领域。

## 5.2 高性能路由交换软硬件系统

在过去几年里，我国的互联网主干网业务量和带宽需求的年增长率已经超过 200%，预计未来几年的年增长率依然会高达 100% 左右，因此 IP 骨干网面临着设备升级和扩容的压力，当前骨干网中 100 ~ 400G 平台路由器无法满足未来网络的带宽急剧增长需求。为充分满足网络扩容要求，构建长期可持续发展的 IP 承载网络，研发基于拥有我国自主知识产权的核心芯片组的单槽 1Tb/s 处理能力、整机容量达到 10T 以上的高端路由器迫在眉睫。同时，随着云计算、大数据的兴起，数据中心网络快速发展，超大容量的数据中心交换机是承载云业务网络的核心设备，研究推出基于拥有我国自主知识产权的超大容量的交换机设备、整机容量可达至 100T 级的数据中心交换机意义重大。高性能网络设备不仅是国家网络基础设施建设与发展中的核心，而且是国家信息产业技术实力的制高点，将为我国自主知识产权的产品保持国际领先奠定坚实的产业化基础。

路由控制方式是互联网体系结构的核心要素，也是互联网体系结构技术演进发展中自由度最大的环节。IPv6 网络地址空间与 IPv4 相比有了若干数量级的增长，能否进行高效、快速、按需、可信的路由，将对互联网及移动互联网传输效率和服务质量产生重大影响。物联网和工业互联网节点的接入，要求路由协议更加轻载、更加具有可扩展性。网络空间进一步扩展到空天网络，网络基础设施也参与了移动，路由协议必须适应拓扑时变、时空跨度大等特点，更好地支持基础设施的移动性。网络空间中，路由的安全可信问题显得更加重要，需要从根本上解决源地址假冒、路由劫持攻击等路由层面的安全问题，实现安全可信的路由机制。此外，如何在 IPv6 巨大地址空间进行高效、可信的编址，也将有助于提高路由的效率。

## 5.3 安全可信网络关键技术与协议

以 IP 为核心的互联网技术已经在世界范围内取得了巨大成功，极大地推动了社会发展，成为继海、陆、空、太空之外的世界第五疆域。然而，IP 协议无连接的本质特征，使得用户访问难跟踪、不可控，给互联网带来了巨大的安全缺陷。在基于无连接 IP 技



术的网络中实现整体安全可信的网络关键技术与协议是互联网发展迫在眉睫的需求，也是一大挑战。安全可信网络关键技术与协议包括为了实现互联网应用所需的硬件和软件的集合，其中硬件包括各种网络设备，如路由器、网桥、交换机、通信链路等，软件包括确保互联网能够正常运行的各种算法、程序和系统，如路由算法、域名系统、网络协议等。新一代安全可信网络需要以真实性为基础，从建、管、防三个角度入手，构建三者之间的联动机制，实现网络的总体安全。

构建可信的网络侧服务是实现网络安全的一个前提，网络可信需要以节点提供的真实服务和网络提供的真实流量为基础，通过网络核心设备自主研发和引入可信机制，并通过节点真实地址来保证网络流量来源的真实性。为了有效管控用户行为，确保主机侧的可信性，需要保证主机提供真实服务以及用户行为的真实性，就需要引入用户身份认证机制。通过对用户行为的真实管控，可全面掌握网络总体情况，评估网络安全态势。依托可信网络侧、用户侧构建的可信网络体系能够实现访问授权、攻击识别和事后追溯，但不能有效制止入侵行为。因此，还需要建立多级别容侵防御体系，包括动态网络虚拟化服务、路由策略自适应控制抗毁自愈、加密安全通道等容侵策略，确保在网络受到攻击、网络设备损毁或丧失真实服务情况下，网络全部业务或关键业务的服务保障。

#### 5.4 智能融合网络

随着传统应用与新兴应用加速融合，应用的业务形态、传输分发、接收服务等全流程都发生了巨大变化，媒体内容格式向 4k/8k/3D 更高清晰度、更高维度的智能化发展，媒体呈现形态从传统的直播单屏向直播与交互协同的多屏方式演进，媒体传输方式从有线/无线/卫星单一方式传输向有线、无线卫星智能协同且与互联网加速融合方向发展，终端服务从传统单一接收设备独立接收方式向任何时间和地点的个性化内容多设备协同接收服务模式转变。上述发展趋势对融合网络的应用传输服务方式和手段及其智能化提出了更新的要求，对融合网络的应用服务质量提出了更高的要求，对融合网络的可管、可控、可信提出了更严的要求，需要视频媒体网络技术与云计算、大数据、SDN 和 NFV 等新一代信息技术的融合创新来支撑，需要在有线、无线卫星智能协同传输与组网方面有所突破，构建智能融合网络。

工业互联网是互联网等新一代信息技术与工业系统全方位深度融合集成形成的新型网络，是工业智能化发展的关键信息基础设施。工业互联网通过构建分布感知、高效融合和低时延、高可靠、广覆盖的一体化网络，全面连接机器、物品、人、信息系统，从而形成科学决策与智能控制，促进制造业和互联网深度融合。

## 6 总结

互联网经过半个世纪的高速发展和演化，取得了很多人瞩目的成就，在当前多网一体化互联融合的发展态势下，网络体系结构和关键技术正处于变革的关键时期，本文对互联网当前发展态势和呈现的主要特征进行了分析，从研究和实践的角度分别对国内

外互联网体系结构和关键技术的发展进行了总结，对我国互联网的未来发展提出了一体化、高性能、安全可信和智能化等建议。

### 作者简介



吴建平，中国工程院院士，清华大学教授，现任清华大学计算机系主任、网络科学与网络空间研究院院长、下一代互联网国家工程实验室主任，兼任中国教育和科研计算机网 CERNET 专家委员会主任和网络中心主任、国家信息化专家咨询委员会委员、中国互联网协会副理事长、IEEE Fellow，曾任亚太先进网络学会 APAN 主席。

# “天眼”等天文学重大科技基础设施的信息化需求与建设现状

崔辰州<sup>1</sup> 于 策<sup>2</sup> 李长华<sup>1</sup> 肖 健<sup>2</sup> 岳友岭<sup>1</sup> 徐 龙<sup>1</sup> 吴 潮<sup>1</sup> 王 锋<sup>3</sup> 张 戈<sup>4</sup>  
何勃亮<sup>1</sup> 樊东卫<sup>1</sup> 李珊珊<sup>1</sup> 米琳莹<sup>1</sup> 谌 悦<sup>1</sup> 许允飞<sup>1</sup> 韩 军<sup>1</sup> 陶一寒<sup>1</sup>

(1. 中国科学院国家天文台; 2. 天津大学; 3. 广州大学; 4. 阿里云计算有限公司)

## 摘 要

随着科学技术的发展,天文学研究已经进入数据密集型科学发现的时代。无论是重大天文科技基础设施,还是一般的天文课题研究,都离不开信息化基础设施的支持。本文以 500 米球面射电望远镜(FAST)、郭守敬望远镜(LAMOST)、明安图太阳射电日像仪(MUSER)、中法天文卫星 SVOM/地面大视场光学望远镜阵(GWAC)、平方千米天线阵(SKA)这 5 个有代表性的重大天文科技计划为例,介绍了重大天文科技计划对信息化基础设施的需求和建设情况,同时介绍了中国虚拟天文台作为国内天文科研信息化公共支撑平台的建设历程和应用,最后对我国天文科研信息化基础设施的发展提出了建议。

## 关键词

基础设施;天文学;天文信息学;虚拟天文台

## Abstract

With the development of modern science and technologies, Astronomy has become a data intensive scientific discovery discipline. Cyber-infrastructure is becoming an intrinsic requirement for both national key scientific projects and daily astronomy research. In the article, cyber-infrastructure requirements and implementations of 5 cutting-edge astronomical projects are described. These projects include the Five-Hundred Aperture Spherical Radio Telescope (FAST), the Large Sky Area Multi-Object Fiber Spectroscopic Telescope (LAMOST), the MingantU SpEctral Radioheliograph (MUSER), the Chinese-French SVOM mission and the Square Kilometer Array (SKA). Furthermore, as a common cyber-infrastructure for astronomy research, a brief overview of Virtual Observatory including its research and development history and current applications is given. Several suggestions are listed in the end of the paper for further development of scientific research cyber-infrastructure.

## Keywords

Infrastructure; Astronomy; Astroinformatics; Virtual Observatory

## 1 引言

基础设施 (Infrastructure) 是指为社会生产和居民生活提供公共服务的物质工程设

施，是用于保证国家或地区社会经济活动正常进行的公共服务系统<sup>①</sup>。基础设施建设的特点是周期长、投资大，具有公益性和普惠性。

科研信息化是指充分利用网络信息基础设施与技术，促进科技资源交流、汇集与共享，变革科研组织与活动模式，推动科技发展转型的过程<sup>[1]</sup>。科研信息化基础设施则指的是科学研究信息化过程中所需要的各类信息基础设施，包括高速科研网络、超级计算和数据应用环境等<sup>[2]</sup>。基础设施是社会赖以生存发展的一般物质条件。科研信息化基础设施则是现代科学研究顺利开展的必要条件。

随着科学技术的发展，天文学研究已经进入数据密集型科学发现的时代。无论是重大科技基础设施，还是一般的课题研究，都离不开信息化基础设施的支持。本文以 500 米球面射电望远镜（FAST）、郭守敬望远镜（LAMOST）、明安图太阳射电日像仪（MUSER）、中法天文卫星 SVOM/ 地面大视场光学望远镜阵（GWAC）、平方千米天线阵（SKA）这 5 个有代表性的重大天文科技计划为例，介绍了重大天文科技计划对信息化基础设施的需求和建设情况，同时介绍了中国虚拟天文台作为国内天文科研信息化公共支撑平台的建设历程和应用，最后对我国天文科研信息化基础设施的发展提出了建议。

## 2 500 米球面射电望远镜

500 米球面射电望远镜（FAST）项目是“十一五”国家重大科技基础设施建设项目<sup>[3]</sup>，由中国科学院国家天文台主导建设，是具有我国自主知识产权、世界最大单口径、最灵敏的射电望远镜（见图 1）。FAST 建于贵州省黔南布依族苗族自治州平塘县克度镇金科村的大窝凼，利用贵州喀斯特地区的山区洼地作为望远镜的台址。FAST 于 2016 年 9 月 25 日落成启用，目前处于综合调试与试观测阶段。



图 1 被誉为“中国天眼”的 500 米球面射电望远镜

① <https://baike.baidu.com/item/%E5%9F%BA%E7%A1%80%E8%AE%BE%E6%96%BD/3831695>。



作为国家重大科技基础设施，FAST 工程部分由主动反射面系统、馈源支撑系统、测量与控制系统、接收机与终端及观测基地等几大部分构成。目前基础设施和硬件已经建设完成，为达到最佳观测效果，各个子系统以及底层驱动软件正在进行调优工作，这个阶段预计在 2 年内完成；在此期间的另一个关键工作是完成 FAST 应用软件系统的建设，将 FAST 全面接入中国科学院的科研信息化网络。

FAST 支持 6 种观测模式，每种观测模式都需要各个子系统的精确配合；根据数据采集率、频带带宽、通道数的不同，观测数据产生率约为 1TB/hr，数据归档量约为 3PB/yr；而数据处理所需的计算量约为 1P flops。

相对于 FAST 的实时流式数据处理，海量天文数据归档涉及的软硬件技术更为广泛和复杂，包括数据中心的硬件系统、网络拓扑、数据布局、存储管理、备份和灾备策略、节能策略、交叉认证，甚至还要考虑如何支持后续的数据分析计算等。

目前，欧洲南方天文台（ESO）于 2004 年推出的开源软件 NGAS（Next Generation Archive System）是天文领域应用较多的一个数据归档系统，图 2 显示了经过改进后的 NGAS 在默奇森大视场射电电阵（Murchison Wide-field Array, MWA）项目中的应用情况。作为一个被广泛应用的天文数据归档系统，NGAS 的最大特点是其插件式的体系结构，允许其在提供基础服务的同时，可根据需要灵活定制和扩展。从 NGAS 的经验看，像 FAST 这类大望远镜的数据归档系统不仅仅是硬件环境的建设，更重要的是支持大量数据日复一日的积累所必需的数据流规范以及可扩展的软件系统。

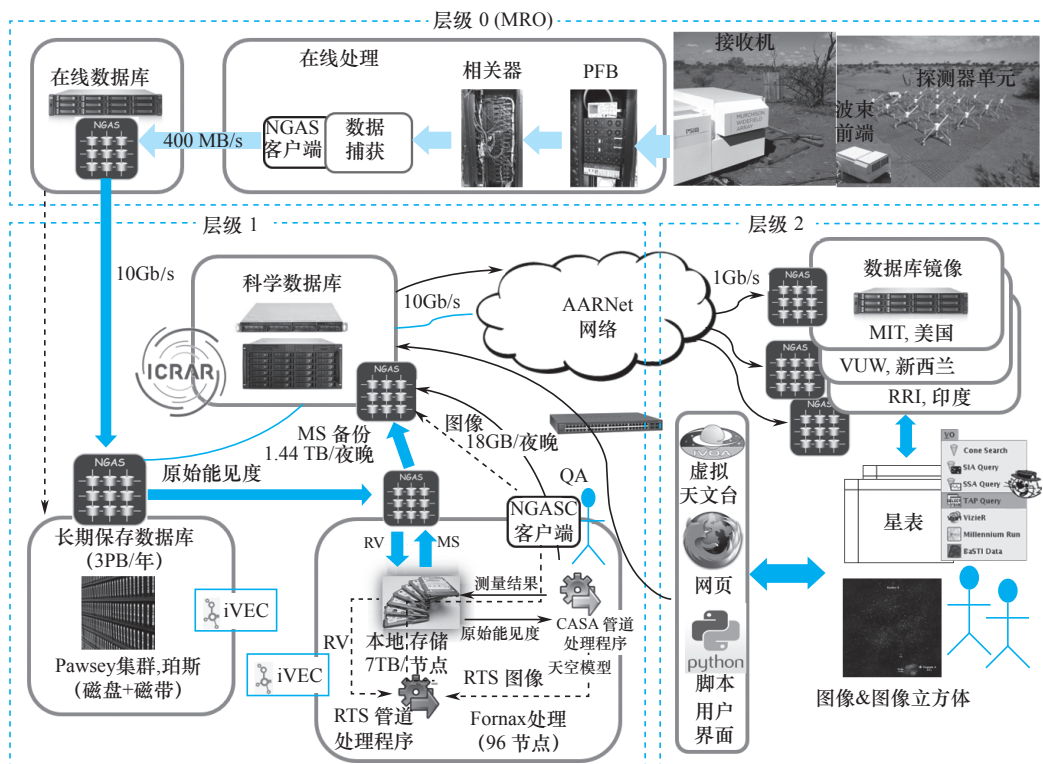


图 2 MWA 的数据归档流程

近几年，在 SKA 数据归档系统的预研项目中，研发人员一直对 NGAS 进行持续优化，而 FAST 也有计划采用 NGAS 作为其归档系统的支撑软件。中国虚拟天文台团队在借鉴 NGAS 的同时，也在积极探索利用云存储技术来提高数据归档系统的性能和水平延展性。

FAST 数据归档系统的建设分两个阶段进行，第一阶段是分布式的可扩展弹性数据中心的硬件环境，这部分的基础建设工作已经完成。除了 FAST 观测站本地的存储和计算设施外，FAST 配套的数据中心和超算平台主要分布在贵州大学、贵州师范大学、黔南超级计算中心。坐落于贵州师范大学的 FAST 早期科学数据中心成立于 2014 年 9 月，功能定位是存储和初步筛选 FAST 原始数据，现有存储量为 2PB，计划存储量 5PB，配有 20 个计算节点。国家天文台-贵州大学天文联合研究中心也将为 FAST 的海量数据提供存储和计算资源，并大力发展与 FAST 密切相关的射电天文技术和方法。黔南超级计算中心由中国科学院计算所高性能计算研究中心、曙光信息产业股份有限公司、贵州天眼集团联合共建，中心部署的“天眼一号”超级计算系统，除了要满足 FAST 工程海量的数据存储、计算、分析、传输等需求外，还将为黔南州、贵州省乃至西南地区提供强大的计算服务。

第二阶段，在上述硬件环境的基础上，建成类似 ESO NGAS 的分布式数据管理系统。中国虚拟天文台与 FAST 科学部正在积极攻克 FAST 的海量数据处理的关键技术，并在参考 Facebook 的 HayStack、阿里云的 OSS 系统的基础上，设计了名为“朱雀”的天文数据管理系统原型，系统共四部分，分别是井（Jing）——数据中心管理；鬼（Gui）——监控子系统；星（Xing）——分布式文件系统；翼（Yi）——数据传输子系统。图 3 显示了整个归档系统的上层结构。

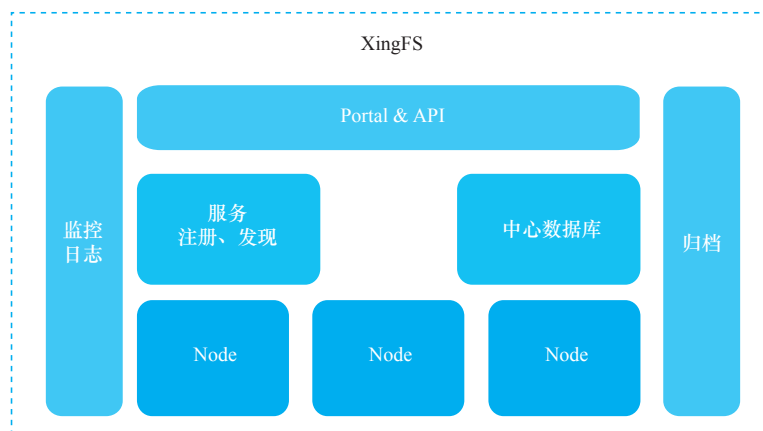


图 3 开发中的“朱雀”天文数据管理系统架构

项目组多方争取支持，在 FAST 建设之初就开始了数据中心的相关研究。2012 年在国家天文台总部已建成一个 5 节点集群，积累了运行维护经验。2016 年 1 月，国家天文台与贵州师范大学合作建成了 FAST 早期科学数据中心贵师大节点（见图 4）。6 月，在 FAST 现场建成了早期科学数据中心大窝凼节点。这两个数据中心节点都包含并行存

储系统和刀片计算节点，总的可用存储约为 3PB，计算峰值接近 50TFLOPS。2018 年这几个数据中心有望实现高速专线光缆相连。



图 4 位于贵阳的 FAST 早期科学中心数据中心

分布式数据中心的建设，使用了不同种类的硬件组合和网络方案，为 FAST 数据中心建设积累了经验。虽然 FAST 数据中心建设已经有一定规模，但是其运行与进一步建设仍然面临技术上的挑战。特别是在缺少场地和资金的情况下，数据中心第一期建设以满足早期科学观测为主要目的。在不断增加的新的科学目标需求下，原有数据中心设计已不能满足高速数据存储和高计算量的需求，需要进一步优化改进以满足新科学的需求，并考虑到后续扩大数据中心规模的设计。

未来 FAST 整个数据中心将至少由贵州大窝凼 FAST 台址、贵阳和北京三个主节点组成，同时将连接到合作单位的分支节点和贵州大数据中心用来计算。FAST 贵阳数据中心是 FAST 数据中心的节点，提供 FAST 数据的长期永久存储和基本的计算能力。

FAST 早期科学阶段将主要采用漂移扫描的观测模式。19 波束接收机的带宽 400MHz，采用 1GHz 采样，原始数据产生率可达 38GB/s。这样的数据获取速度无论是对传输还是对存储都是技术挑战。FAST 大窝凼现场的数据信号主要经过接收机、线上处理和现场存储三个部分。接收机将收集到的模拟信号转换为数字信号，数据以最高 38GB/s 的速率传输给线上处理器。线上处理器包括了 FPGA 支持的多相滤波器组和 GPU 计算单元。原始数据经过线上处理后，数据得到一定压缩，数据产生率压缩至 6GB/s，先存储到现场，之后快速传输至贵阳。

贵阳的数据中心重点任务是数据存储。数据从大窝凼现场通过高速光纤网络传输到贵阳数据处理中心机房。数据存储系统为分级存储，主要由内存、固态硬盘、磁盘阵列、磁带库几级组成。分级存储系统自动控制数据的移动，同时提供应用程序接口，以供用户访问磁盘和磁带中的数据，优化数据移动和分级存储。

计算拟由 200 个节点组成的计算集群提供，就近安放在贵阳数据中心。部分镜像档案库存放在北京国家天文台本部。数据从贵阳的远程档案库传送到北京的镜像档案库的

过程,可以利用专用网络或基于公共网的 VPN。

FAST 未来 5 年预计会产生超过 20PB 的科学数据,随着电子技术的发展,数据量可能更多。FAST 数据中心贵阳节点第一期将实现 20PB 存储,满足 3 年左右 FAST 望远镜运行的需求,数据做到长期保存,同时为 FAST 未来 5 年预留足够的发展空间。未来 5 年 FAST 数据量有可能达到 30 ~ 50PB。

由于 FAST 台址自然条件的限制和无线电宁静的要求,无法建设大型的数据中心,FAST 主要的数据存储和处理将在贵阳进行。脉冲星、快速射电暴、中性氢等多个科学目标的同时观测,需传输至贵阳的原始数据率为 6 ~ 8GB/s,需要的网络专线为 100GbE。100G 专线在天文界还没有应用,未来 SKA 需要比此更多的带宽。如果能建成 100G 专线,不但可以为 FAST 解决未来 5 ~ 10 年的数据传输瓶颈,也可以为我国竞争 SKA 工作包提供研究基础,从而带动贵州大数据产业的发展。

FAST 是单口径望远镜,较 SKA 等阵列望远镜的数据传输需求低。随着网络技术的发展,未来 400GbE 和 1TbE 得到应用,那么可以做到实时将采样数据传输至贵阳,同时伴随 GPU 技术的进展,可以做到基带数据实时处理。突破数据传输和计算的瓶颈,实现相干消色散搜索脉冲星和射电暴等 10 年前难以实现的算法,开辟新的天文学研究方向。

### 3 郭守敬望远镜

郭守敬望远镜(LAMOST,大天区面积多目标光纤光谱天文望远镜)是一架新型的大视场兼大口径望远镜,即“王-苏反射施密特望远镜”<sup>[4,5]</sup>。它是由反射施密特改正板 MA(大小为 5.72 米×4.40 米,24 块对角线长 1.1 米,厚度为 25 毫米的六角形平面子镜组成)、球面主镜 MB(大小为 6.67 米×6.05 米,37 块对角线长为 1.1 米,厚度为 75 毫米的六角形球面子镜组成)和焦面构成。球面主镜及焦面固定在地基上,反射施密特改正板作为定天镜跟踪天体的运动,望远镜在天体经过中天前后时进行观测。天体的光经 MA 反射到 MB,再经 MB 反射后成像在焦面上。焦面上放置的光纤,将天体的光分别传输到光谱仪的狭缝上,然后通过光谱仪后的 CCD 探测器同时获得大量天体的光谱。LAMOST 应用薄镜面主动光学加拼接镜面主动光学技术,在曝光 1.5 小时内可以观测到暗达 20.5 等的天体,使其成为大口径兼大视场光学望远镜的世界之最。同时,采用并行可控的光纤定位技术,在 5 度视场、直径为 1.75 米的焦面上放置 4 000 根光纤,同时获得 4 000 个天体的光谱,使其成为世界上光谱获取率最高的望远镜。LAMOST 安放在中国科学院国家天文台兴隆观测站,该站地处燕山主峰南麓,位于河北省兴隆县连营寨(地理坐标为东经 117°34'38",北纬 40°23'45"),海拔 960 米。

作为国家重大科学工程,LAMOST 于 2001 年 9 月开工,2008 年 10 月落成(见图 5),2009 年 4 月通过了中国科学院组织的工艺鉴定和建安、财务、设备、档案四个专业组的验收,并于 2009 年 6 月 4 日圆满通过了国家发展和改革委员会主持的国家验收。LAMOST 的建成,突破了天文望远镜大视场与大口径难以兼得的难题,成为目前国际上口径最大的大视场望远镜,是我国光学望远镜研制的又一里程碑,显著提高了我国在大视场多目标光纤光谱观测设备领域的自主创新能力。





图5 2008年10月落成典礼当天的郭守敬望远镜

2011年10月23日，LAMOST正式启动先导巡天，并于2012年6月24日结束。2012年9月，LAMOST正式进入科学巡天阶段。2017年6月，LAMOST圆满完成了为期五年的第一期光谱巡天任务。此间，LAMOST共进行了1668天的科学观测，积累原始观测数据16.53TB。原始观测数据传输与归档流程如图6所示。首先在国家天文台兴隆观测基地保存一个完整的备份。次日通过连接国家天文台总部和兴隆观测基地的光纤专线将原始观测数据和相关的元数据传输到位于天文台总部的中国虚拟天文台（China-VO），实现数据和元数据的入库。入库后的数据和元数据将定期上传至中国科技云和阿里云等处进行备份和异地容灾。

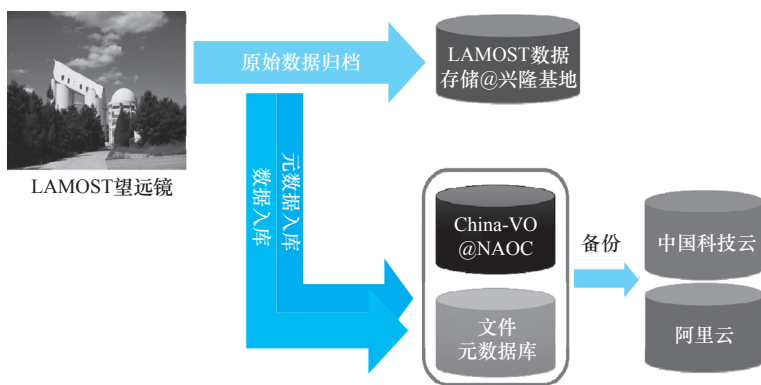


图6 LAMOST 原始观测数据传输与归档流程

截至2017年6月，第一期光谱巡天任务结束，LAMOST共获取了约900万条天体光谱数据，远远超过了全世界光谱巡天项目获取的光谱数总和。其中高质量光谱数（信噪比大于10）约725万条，恒星参数约492万组。

LAMOST在国际上率先实现了天区覆盖连续、统计无偏的大样本银河系光谱巡天，建立了全球最大的有传承价值的天体光谱数据库。利用这些海量光谱数据，天文学家在

银河系结构与演化及河外天文学等重要前沿领域已经取得了一系列有影响力的研究成果。

近 6 年时间，整个一期光谱巡天积累的原始观测数据为 16.53TB，怎么能说是海量数据呢？其实不然！要知道，LAMOST 进行的是光谱巡天观测，每个天区的曝光时间至少要 1.5 小时。这与数秒钟短曝光就能完成的图像测光观测非常不同。因此，每条光谱的“含金量”都很高，不能简单地用数据量的大小来衡量科学产出的价值。

## 4 明安图太阳射电日像仪

明安图太阳射电日像仪（MUSER）是我国自行研制的、国际上最先进的太阳射电频谱成像设备，于 2009 立项，2016 年 7 月验收，初期总投资 6 510 万元，并列入国家重大科研装备研制项目（见图 7）。太阳剧烈活动研究是太阳物理的主要方向，也是我国《中长期科学和技术发展规划纲要》在学科发展和科学前沿问题中部署的主要研究领域之一。



图 7 明安图太阳射电日像仪

明安图太阳射电日像仪瞄准在太阳爆发能量初始释放区高分辨射电成像观测的国际科学空白<sup>[6,7]</sup>，对太阳剧烈活动的起源和发生发展规律研究取得原创性研究成果，使我国在该领域跻身世界前列，并大大提升了我国在太阳活动预报方面的能力，为航空、航天、卫星通信和国防建设等提供有力保障。

新一代厘米-分米波射电日像仪采用了综合孔径技术，目标是成为同时具有高空间分辨率、高频率分辨率和高时间分辨率的新一代太阳专用射电成像观测设备。射电日像仪分为高、低频两个阵列，总共 100 面天线排列在方圆 10 平方千米的三条旋臂上。所有天线均配置高性能超宽带双圆极化馈源，室外接收单元采用高精度恒温装置，高稳定接收系统接收的太阳射电信号在中心计算机分布式控制下，经过 100 根 3.4 千米长、铺设在地下 2.5 米深处不冻土层内的光缆，传输至中心观测室，进行集中的模拟接收放大和变频、大规模高速数字相关阵列处理、存储、校准和观测数据处理，获得实时高质量多维的太阳图像。

新一代厘米-分米波射电日像仪的主要特点是大动态范围下同时高时间、高空间、高频率分辨率太阳射电成像观测，在 0.4 ~ 15GHz 频带上以约百毫秒量级的时间分辨率、最高达 1 角秒量级的空间分辨率和 500 多个通道的频率分辨率对太阳进行连续成像观测。在时间、空间和频率分辨率上均远优于国际现有设备。这使得整体数据处理的要求较高。MUSER 天线阵分为低频和低频两个部分，具体说明如下：

- MUSER-I 低频阵，共有 40 个天线基站，相关通道总数为  $(40 \times 39 / 2)$ ，每个相关通道在 3ms 内产生 16 个频点，假设每天观测 10 小时，最高时间分辨率为 3ms，每秒数据流量约 32MB，每分钟产生 1.92GB 数据，每日约 1.2TB 数据，每月数据量接近 36TB。
- MUSER-II 高频阵，由 60 面抛物面天线及接收设备组成，每一面天线的直径是 2 米，在 528 个频率点上重建天文图像，假设每天观测 10 小时，则每天所产生的数据量约为 3.3TB。因此，当 MUSER 系统设备全部进入正常观测和运行后，MUSER 每月所产生的观测数据量则将接近 150TB。

此外，如果按实时数据处理的要求进行 MUSER 的成图计算，则需要在 3ms 内处理完低频和高频各 16 个频率的图像。图像大小在 400MHz 低频时为 256 像素，但在高频时需要达到 5120 像素。同时，图像的处理中会频繁地涉及傅里叶变换等密集计算。

为了满足 MUSER 高分辨率观测、高速数据接收与处理需求，图 8 给出了 MUSER 的分布式数据处理框架。MUSER 天线接收的数据首先经过相关算法对异常数据进行标记后进入数据处理系统。数据处理系统采用多节点分布式并行计算，由多种工头分别管理工人分别完成数据的预处理、数据格式的转换、图像的生成和实时监控等任务。其中，在各个处理过程中，会涉及数据的检索、仪器状态、天气状态或星表计算等，可与服务窗口以 ZeroMQ 通信并获取相关信息。最终生成的图像或 FITS 文件将以网络方式进行发布共享。

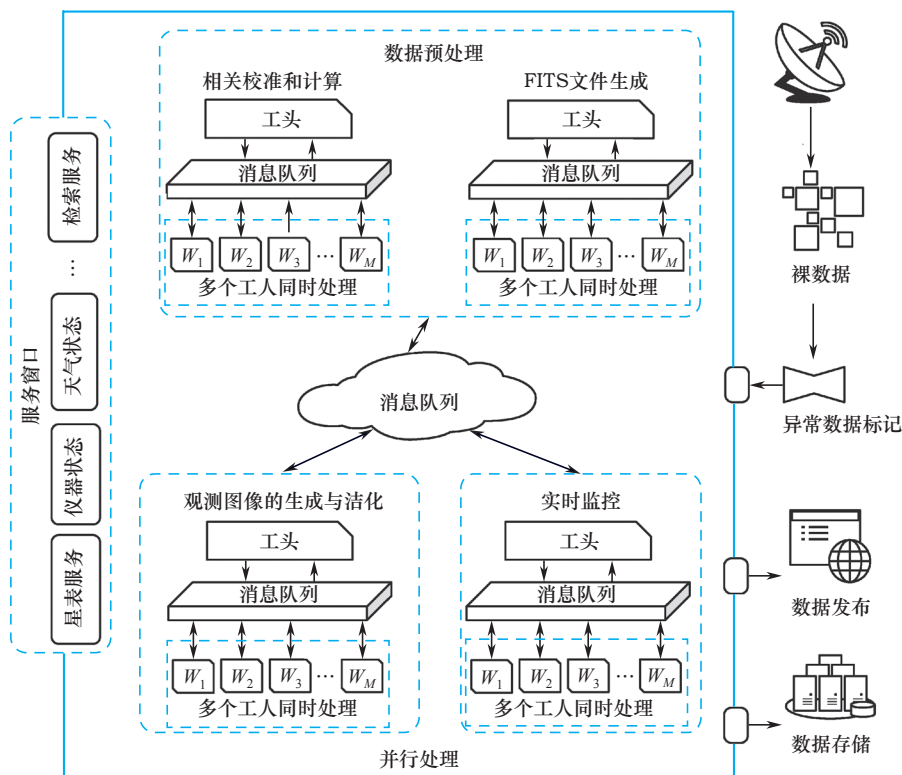


图 8 MUSER 分布式数据处理框架



MUSER 在 2016 年 7 月通过验收。至 2016 年 12 月, MUSER 所在的明安图太阳观测基地的整体平台情况如下。

- 互联网接入: 中国移动 40Mb/s 光纤专线。
- 计算平台: 8 台高性能计算服务器。
- 存储: 4 套, 分别用于低频、高频、后续备份和实时数据处理, 当前容量约 80TB。
- 台式计算机: 20 台。
- 应用平台: OpenCluster (自主开发完成)。
- 数据发布平台: 自行开发, 位于国家天文台北京总部。
- 数据库软件: MySQL 和 Redis。

这样的信息化基础设施的支撑能力距离 MUSER 常规科学观测的需求还有很大差距, 需要在今后不断地扩展和提升。MUSER 的数据存储和共享是目前面临的重大问题之一。项目组正在积极筹划与阿里云华北(位于河北省张北县)节点的对接, 希望借助于中国虚拟天文台专有云和阿里公共云, 实现数据的长期保存和开放共享。

在未来若干年里, MUSER 都将是国际上领先的太阳射电望远镜, 受到国际太阳物理界的高度关注, 可望在探索太阳剧烈活动的起源和发生、发展规律方面获得原创性成果。

## 5 中法天文卫星和地面大视场光学望远镜阵

计划于 2021 年发射的中法天文卫星(SVOM)是中法两国政府间的合作项目(见图 9), 其主要科学目标是宇宙中伽马暴的多波段探测<sup>[8,9]</sup>。SVOM 卫星上载荷包括软伽马射线成像仪(ECLAIRs: 法方)、伽马射线监视仪(GRM: 中方)、X 射线望远镜(MXT: 法方)、光学望远镜(VT: 中方), 以及地面望远镜[大视场光学望远镜阵(GWAC: 中方)、中法双方独立建造的专门后随望远镜(CGFT: 中方和 FGFT: 法方)]。



图 9 中法天文卫星(SVOM)

SVOM 项目专用设计仪器特点,使其与国际上同类项目相比,对高红移伽马暴和近邻的暗/软暴的探测有着更高的敏感性与探测能力。同时,中方专门建造的地面大视场光学望远镜阵得益于其大视场(约 5 000 平方度)和高时间采样(15 秒钟一帧)的设计特点,将会在伽马暴瞬时射线的观测及宇宙中爆发的暂显源的光学搜索领域具有独特的科学探测优势。项目建成后将对我国在空间天文、伽马暴的观测研究、瞬变源的观测与研究,带来极大的提升。同时在天地多波段一体化跟踪联测,以及大数据的处理等信息技术方面也将带来极大的提升。

SVOM 项目的主要科学目标是伽马暴及瞬变源(引力波电磁对应体、中微子事件电磁对应体等)的多波段观测以及天地多波段联测,这就要求天地之间以及分布在世界各地的望远镜之间的同步协调观测具有可靠的数据传输网络,以及优化传输协议与数据格式,同时,要求具有简单、可靠、通用的望远镜远程控制平台,实现各望远镜观测网络的远程联合观测。

大视场光学望远镜阵(Ground Wide Angle Cameras, GWAC)是 SVOM 项目的地面观测系统,按照设计由 36 台口径 18 厘米的广角望远镜组成,每台望远镜配备  $4k \times 4k$  像素分辨率的 CCD 相机。相机阵覆盖天区 5 000 平方度,时间采样率为 15 秒。每个观测夜中,对固定天区的持续观测长达 4~5 小时。得益于其大天区覆盖性和高时间采样率,GWAC 在发现突发源、短时标瞬变源和高时间分辨率光变曲线研究方面有独特的优势。

GWAC 观测设备的大视场(5 000 平方度)和高时间分辨率(每 15 秒一次采样)的特点,使得该设备在每 15 秒钟将产生:0.66 千兆像素的图像数据的数据流, $6 \times 10^6$  条数据记录(每条记录约有 20 列属性参数)的星表数据。每个观测夜产生的总图像数据量为 4.9TB,星表数据为约  $1.0 \times 10^{10}$  条记录/晚。GWAC 的主要科学目标为寻找瞬变源及光变异常目标源,瞬变源的发生具有偶然性及稀有性,要求对所有观测的数据进行全面的监控管理,并进行快速的实时处理。

GWAC 在全负荷运行下,每天将产生 TB 量级的原始数据。在经过数据处理后,又会产生大量的各种高级科学产品,包含暂现源样本、巡天星表、各种类型的光变样本、太阳系内小新星亮度和轨道参数等。在日复一日的运行中,这些数据都呈几何级增长。所有这些原始数据、定标数据、高级产品等具有如下几个特点。

(1) 数据量大:在连续运行 3 年后,原始数据将会达到 PB 量级。如果考虑到其他科学产品,数据量可能还要增加几倍。如此大的数据量在数据管理和发布上都会有很大的挑战。

(2) 科学数据和产品类型异常多:比如有各种类型星表,有各种类型原始和定标数据。

(3) 用户需求及其广泛:对 GWAC 数据感兴趣的研究人员中可能有研究小行星的、双星或者多星系统的、超新星的、伽马射线暴的,等等。还有一些对此感兴趣的天文学家可能是研究其他暂现源的,如与黑洞或者中子星并合过程有关的引力波电磁对应体等。

这些特点将要求项目组在进行数据对外发布时,必须考虑如下两个问题:以何种方式发布?如何能够更好地服务于各领域的研究人员?

考虑到科学产品和数据类型的多样性,以及天文人员需求的复杂性,在对外发布数据时将采取两种方式。

(1) 主动发布:比如巡天星表、变星光变表之类的。这些数据将主要以公开网络数据下载和硬盘硬复制两种方式为主。但是两种方法都有各自的风险,前者需要考虑网络的稳定性、速度及安全性,可以提供多用户同时大数据量的请求与下载;后者则主要是在复制中途所占用的时间比较长,以及大硬盘携带的数据安全性等。

(2) 被动服务式发布:将建立以数据库管理和网页请求为基础的数据发布系统,用于国内国际天文各领域对 GWAC 数据感兴趣的研究人员进行特定类型数据的获取。这样的好处是能够最大化地对 GWAC 数据进行利用,并满足各领域不同天文学家的需求。

GWAC 在国际上属于大视场和高时间采样瞬变源巡天的前沿,兼具大视场和高时间采样的特点(每 15 秒钟完成一次采样,其总视场约为 5 000 平方度)。同时,在天文观测领域的多个方面都对现有技术提出了挑战:如具有时序特点的大数据管理、实时快速数据处理、大数据人工智能快速分析与挖掘等技术。针对以上 SVOM 项目对于信息技术的需求与挑战,SVOM 项目中方团队瞄准国际前沿,立足国内实际情况开展了相应的研究和方案规划。

(1) 天地一体化联测网络。要求快速实时传递瞬变源事件的发生信息;要求建立基于互联网的一个具有警报触发机制的消息传递网络,即当 SVOM 卫星发现伽马暴或者 GWAC 及其他地面望远镜发现瞬变源时,将所发现源的信息及时地传递给网络内的其他望远镜实现联动。现在较流行的消息传递网络是 GCN,但随着事件数目的增加,即瞬时可传事件数据的增加,同时,接收消息的连接用户数增加,以及加密和密码认证等安全性要求,越来越有需要研究和寻找一个新的消息传输系统以及数据格式和协议的定义等。天文界正在积极研究基于 pub/sub 的消息传递机制,并且积极推进建立 VOEvent 消息数据传输标准格式。

SVOM 中方团队与法方团队联合开发 SVOMNet 传输网络,消息实时传输的网络主要基于以下几种方案:基于 XMPP 的利用 openfire 实现的消息机制;基于网络事件驱动引擎 twisted 的 VTP (VOEvent Transport Protocol);基于被称为“史上最快的消息队列”ZeroMQ 通信协议的传输方案。这几个方案都在同时进行测试和性能评估中。主要的几个评估性能要求:消息数据的传输速度(与用户数目和消息数目的关系)和消息传递的可靠性(内容不丢失、保证正确传递、网络中断的自我诊断功能)。

研究实现对于消息数据实时响应的自动观测系统方案。主要数据传输工作环路为:接收实时传递的警报消息;望远镜端自动响应警报消息;望远镜端自动将望远镜指向观测目标;获取数据后自动对数据进行处理;将处理结果自动传回科学中心;观测者可以通过自动观测系统进行人工干预,并实现观测策略的更改及状态查询。

(2) 开发空间载荷仿真系统。针对中方的光学望远镜载荷,为实现对载荷设计的有效验证、开发数据定标策略、评估载荷探测能力,中方团队开发了空间光学望远镜图像仿真器。仿真器涉及 CCD 相机、噪声仿真、光学成像 PSF 轮廓、透过率、响应曲线、空间天光背景、观测目标分布等,是一个综合的集成系统。这样一个通用的基础性平台

将对于我国空间天文具有基础性意义。

(3) 快速、准确的数据实时处理能力。要求能快速鉴别与测量出数据属性；SVOM 项目观测的科学目标要求对于数据具有快速的实时处理能力。即要求快速对伽马暴（瞬变源）目标的识别能力。主要体现在：快速交叉证认算法、多星表融合技术（支持多星表的联系查询）、硬件与网络资源稳定性。

建立多个巡天星表融合的星表数据库，为伽马暴的证认提供后台证认查询支持。主要的技术问题包括：多个星表的融合技术（包括数据定标的一致性等问题）、后台数据库技术、云平台技术或本地快速数据查询支持。开展快速交叉证认算法的方案研究，为多星表的快速交叉证认提供支持。

(4) 大数据的实时处理能力。独立研发 SVOM 项目中的 GWAC 系统每 15 秒钟会产生 40 幅  $4k \times 4k$  的图像，为了避免数据流累积，要求 15 秒内完成以上图像的所有处理，包括点源提取、交叉证、数据入库、瞬变源的搜索等主要步骤。采用分布式平行处理方案，对硬件资源进行有效组合，实现并行化处理。开展基于 GPU 技术的并行化处理加速方案研究，主要研究包括快速交叉证认、点源提取、图像相减等方面。进行基于 PostgreSQL 内核技术的加速入库方案研究。

(5) 大数据的人工智能挖掘能力。GWAC 相机每晚将产生约  $1.0 \times 10^{10}$  条星表记录。如何从大数据的时序星表记录中挖掘出特殊光变的天体，如微引力透镜事件，必须依赖于大数据人工智能挖掘技术。另外，利用图像法寻找瞬变源也需要人工智能的技术实现从大量噪声中把瞬变源筛选出来。

SVOM 项目中方团队采用机器学习方法中的随机森林算法实现对瞬变源进行有效筛选。同时，采用自回归移动平均模型（ARIMA 模型）分析光变数据，进行数据流的自动处理。该方案的优点为：①采用动态流数据的异常检测，并采用滑动窗口的方法，能实时判断在一个固定窗口宽度内的采样点是否时变异常。②对历史数据的统计与预测不依赖实际的光变周期等相关数学模型参数，即无须先验模型。③不需要或尽量少地人工干预参数，计算过程中能自适应地调整参数。其他的机器学习方案仍在研究与开发中。

(6) 大数据的管理能力。GWAC 相机的高时间采样与大视场的设计特点，使得时序星表数据每晚以约  $1.0 \times 10^{10}$  条星表记录增长，预计在 10 年的执行期限内将达到 1 000 亿条记录。这对传统的数据库管理平台提出了挑战，需要研究与开发具有大数据存储能力的数据库管理平台。SVOM 中方团队研究采用列存储数据库 MonetDB 作为数据库管理平台，并采用 Shared-nothing 分布式存储方案。MonetDB 在大数据计算和存储中有着出色的表现，采用 MonetDB 具有将计算带到数据中去的优势，从而实现数据的快速处理。通过对数据系统的优化，为大数据管理处理平台提供一个具有优势的选项。

## 6 平方千米射电望远镜阵

国际大科学工程平方千米射电望远镜阵（Square Kilometer Array, SKA）是国际



天文界计划建造的世界最大综合孔径射电望远镜（见图 10），其接收面积达一平方千米，频率覆盖  $70\text{MHz} \sim 25\text{GHz}^{[10]}$ 。SKA 由大约 3 000 个 15 米口径抛物面天线、250 组中频和低频孔径阵列（Aperture Array）组成，分布范围大于 3 000 千米，形成旋臂阵列望远镜。SKA 将建在澳大利亚、南非及非洲南部 8 个国家的无线电宁静区域。目前，SKA 处于建设准备阶段（2012—2018 年）后期，由 SKA 独立法人机构 SKAO（SKA Organization）领导，包括英国、澳大利亚、南非、中国、荷兰、意大利、新西兰、加拿大、瑞典和印度 10 个正式成员国。SKA 建造经费约需 80 亿欧元，由多国政府及国家研究机构联合筹资，分两个阶段建设：第一阶段 SKA1（2019—2024 年）建设约 10% 的 SKA；第二阶段 SKA2（2025—2030 年）建设其余部分的 SKA。

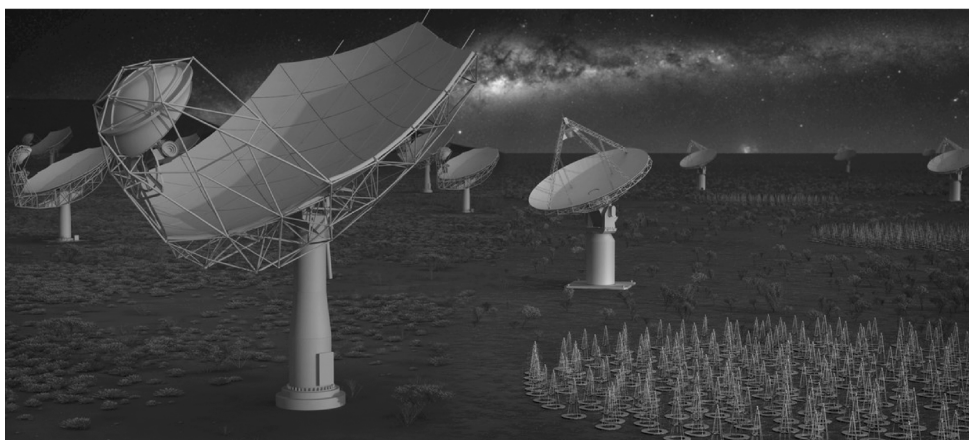


图 10 SKA 望远镜

自 1993 年国际合作启动，SKA 历经了 20 多年的发展，在工程概念发展、望远镜选址、科学目标凝练及关键技术研发过程中，演变成为多国合作的国际大科学工程计划。SKA 将为人类认知宇宙提供重大机遇，也需要付出和当年哈勃太空计划、大型强子对撞机等那样的巨大努力。SKA 项目的特点决定了其在各个方面都需要技术创新，如低成本天线、大容量数据传输、高速并行处理计算机、大容量数据存储单元等。

SKA1 中频阵由 200 个 15 米直径碟形天线组成，分布于 150 千米的范围内。每个碟形天线把天体射频信号收集到馈源，经模拟放大、滤波、混频、同步校准，通过 ADC 转换为数字信号，由光纤传输到中心数据处理系统（CSP），数据流量为每个天线  $90\text{Gb/s}$ 。CSP 系统对每对天线、每频率通道进行复相关计算（如脉冲星信号消色散与时序处理），得到“空间相干数据”。CSP 输入数据量是  $28\text{Tb/s}$ ，输出数据量是  $38\text{Tb/s}$ 。空间相干数据通过光纤传到科学数据处理系统（SDP）。SDP 的计算需求为  $150\text{PFLOPS}$ ，数据存储需求为每天  $57\text{PB}$ 。SDP 进行自校准和反卷积等迭代，产生射电源分布图像。满足科学需求的射电源图像保存在存储系统中，再由天文学家进行数据分析后，形成科研产出。

SKA 数据处理硬件设施分为 CSP 系统和 SDP 系统两部分。CSP 系统主要进行波束合成、相关计算、快变射电信号源（如脉冲星）检测等。CSP 距离天线阵较近，所处

位置人烟稀少、电力有限,采用低能耗高密集大规模实时硬件处理技术(FPGA/DSP),完成算法单一、数据流巨大的任务(相关、折叠和移相等)。SDP进行图像处理和科学研究,所处位置交通相对便利,电力相对充足。SDP的硬件平台将由许多计算岛组成,每个计算岛又由许多计算节点组成,计算岛和岛之间由相关的如共享文件系统、管理网络等相连,但是又相对独立,且其中的计算节点数并不一定相同,配置也不同。其挑战是处理速度、大规模并行、大数据流、大缓存和低能耗。

SKA区域中心SRC(SKA Regional Center)尚处于酝酿和初步设计阶段,目的是承接SKA大数据、为SKA用户提供科学研究平台。SKA国际组织SKAO组建了SKA区域中心协调小组SRCCG(SKA Regional Center Coordination Group),提供概念设计和全球协调。中国正在积极筹划SKA中国区域数据中心。

SKA数据中心的建设周期为2019年,将在澳大利亚和南非/非洲8国同时建设。两台址国的科学数据处理中心分别位于西澳的珀斯和南非的开普敦。为及时将SKA的科学数据传输到国内,供国内天文学家使用的同时向亚太等国际用户提供服务,需从西澳珀斯、南非开普敦到中国的SKA区域数据中心架设100 Gb/s光缆专线,具备每年300~500PB的数据传输量能力。目前这个重大数据传输需求尚未找到切实可行的解决方案。

## 7 中国虚拟天文台

随着天文学领域数据量的不断增大,科研协作日益广泛,传统的研究模式也必须改变。2000年前后,天文学家意识到有必要对天文数据访问所有过程进行标准化,提出了一个跨天文学科、计算机学科、信息学科的概念——虚拟天文台(Virtual Observatory, VO)。为了将各国在虚拟天文台方面的努力联合在一起,2002年6月在德国召开了一个名为“走向国际虚拟天文台”的国际会议。会上成立了国际虚拟天文台联盟(IVOA)<sup>[1]</sup>。国际虚拟天文台联盟成立了多个工作组,致力于为实现数据的互操作而制定相关的标准和规范,使数据产品的生成、数据发布、数据发现、数据访问和获取都在标准的VO框架下进行。天文学家只需登录到虚拟天文台系统,便可以享受其提供的丰富资源和强大的服务,使自己从数据收集、数据处理这些烦琐的事务中彻底摆脱出来,而把精力集中在自己感兴趣的科学研究问题上。

国际虚拟天文台联盟到目前已经发展到了21个成员项目。作为天文数据互操作标准和协议制定的主体,IVOA先后设置了应用、数据访问层、数据模型、网格和Web服务、注册、语义、VO Table、VO查询语言、VOEvent、数据履历和保存、教育、知识发现、运行、理论、时域等工作组和兴趣组。

天文学领域中的海量数据通过大型的数据中心或者小型的研究团队来进行管理,以互联网为平台把这些数据以及相关的计算等资源提供给天文学家等用户使用,构成IVOA架构中的资源层。数据和计算资源的消费者,或者是个体天文学家,或者是研究团队,或者是计算机系统,通过用户层和下面的资源进行交互。虚拟天文台则是这个架构中连接资源层和用户层的那个中间层,它以无缝透明的方式将两者连接在一起。VO

为资源提供者提供了一套技术框架,使得这些资源可以被共享,让用户能够找到这些资源,得到并使用它们。IVOA 制定的一系列协议和规范就是要为这些功能的实现提供指导和约束。

虚拟天文台的诞生,消除了各个数据库系统访问标准不统一的问题,使得数据交叉认证、图像光谱数据的分析等工作有了相应的工具来完成。通过使用这些工具,天文学家可以避免一部分重复性工作,节省了宝贵的时间。经过各国 VO 团队的努力,前面所述的一些服务,也已经部分或全部在 VO 的框架下有了具体的实现。例如,VOspec、Aladin、SPLAT、VOSesame、VOplot、TOPCAT、Iris 等都是出色的 VO 应用程序。目前,全世界已经有上百家天文数据中心或天文项目宣称支持 VO 的标准。美国宇航局、欧洲空间局要求其天文科学计划在数据发布时都要遵循 VO 的标准。欧洲空间局一直非常支持 VO 的发展,要求其全部的天文数据库与 VO 的标准兼容,同时积极参与 VO 应用和工具的开发,如 VOSpec、VOQuest、Registry、DALToolKit 等。通过参与欧洲的 VO 计划以及 IVOA,欧空局 VO 项目在 VO 标准制定等方面也发挥着积极的作用。

如果未来的天文数据都在 VO 的标准下进行统一管理,天文学家只需掌握 VO 的一些工具,即可调动所有的天文数据资源来开展科研工作。虚拟天文台已经成为全球天文学研究重要的公共信息化支撑平台。

以中国科学院国家天文台为首的中国天文学界在 2002 年提出了中国虚拟天文台 (China-VO) 的设想<sup>[12]</sup>。2002 年 China-VO 成为国际虚拟天文台联盟成员。China-VO 的重点研发领域包括中国虚拟天文台系统平台的开发、国内外天文研究资源的统一访问、支持 VO 的项目与观测设施、基于 VO 的天文研究示范和基于 VO 的天文科普教育等几个方面。中国虚拟天文台自提出之初就把自己定位为一个应用型研究计划,目标是在天文学和信息技术之间起到桥梁和纽带的作用,让先进的信息技术服务于天文学的研究。

中国虚拟天文台在 2014 年基于 CloudStack 完成了天文领域云平台的研发,在国内多个地方部署了云节点。自 2016 年下半年开始,以阿里云为切入点,China-VO 全面探索“公共云+专有云”的混合架构解决方案。由中国科学院各天文台站和多家合作伙伴共同开发建设的中国虚拟天文台充分利用了各台站和中国科学院现有网络、存储、计算等信息化基础设施,借助先进的信息技术和虚拟天文台领域的研究成果,以国内核心天文观测设备的时间申请、审批,数据汇交、共享和使用为线索,融合天文观测和科研活动所需的科学数据、云计算、软件和实用工具等资源,形成一个物理上分散、逻辑上统一的网络化科学研究平台;服务从望远镜时间申请一直到科学论文撰写的整个科学研究过程,实现信息化基础设施及资源与天文学研究活动的直接融合;提升天文观测设备的运行水平,促进设备和科学数据的开放共享。中国虚拟天文台是一个数据驱动的科研信息化环境,基于标准、完整、有质量保障的元数据和科学数据系统,通过具备互操作能力的软件、工具和服务,旨在为天文学家等科学用户打造一个覆盖科学研究全生命周期的信息资源平台(见图 11)。





图 11 中国虚拟天文台门户

实测天文学家的科研活动可以划分为望远镜时间申请、科学观测、数据处理、成果发表等基本环节。天文学家为了取得开展科研课题所需的观测数据，以观测提案的形式向望远镜时间分配委员会提交时间申请；通过科学观测获得所需的原始观测数据；借助软件工具对原始数据进行分析处理得到数据产品；获得的科学研究成果以科研论文等形式发表和共享，同时数据产品按照天文学领域的惯例开放共享。天文学家的每一步科研活动，每个环节的输入输出都在虚拟天文台环境中给予记录和保存，分别形成观测提案库、原始数据库、软件工具库、数据产品库、论文成果库等，同时系统中还留存详细的日志和元数据信息。科学思想产生、数据获取、数据处理、成果共享，一个完整的科学研究过程实现了可溯源管理。

数据存储的物理上分散的各个天文台或天文观测站，各台站均建有本地数据中心，负责维护所辖望远镜的观测数据。其中，国家天文台作为中国虚拟天文台的主节点，除了维护自身的数据外，还有其他台站的部分数据，以及国外多个大型巡天项目和数据库系统的数据镜像。

中国虚拟天文台是云计算中软件即服务（SaaS）、平台即服务（PaaS）、基础设施即服务（IaaS）三种服务模式的混合体，其整体功能结构如图 12 所示。整体上，中国科技云与阿里云作为整个系统的两大基础支柱，各天文台站作为主要的资源节点，通过中间的基础平台（见图 13），利用虚拟化技术和云计算技术，将分散的存储、数据、计算等资源进行统筹管理并以统一的方式提供给上层的各个集成业务平台。用户系统与授权服务、资源监控与容错服务作为系统的左右控制中枢，收集各个业务平台的用户操作日志、运行时信息，协调系统资源的使用，保障系统的稳定运行。

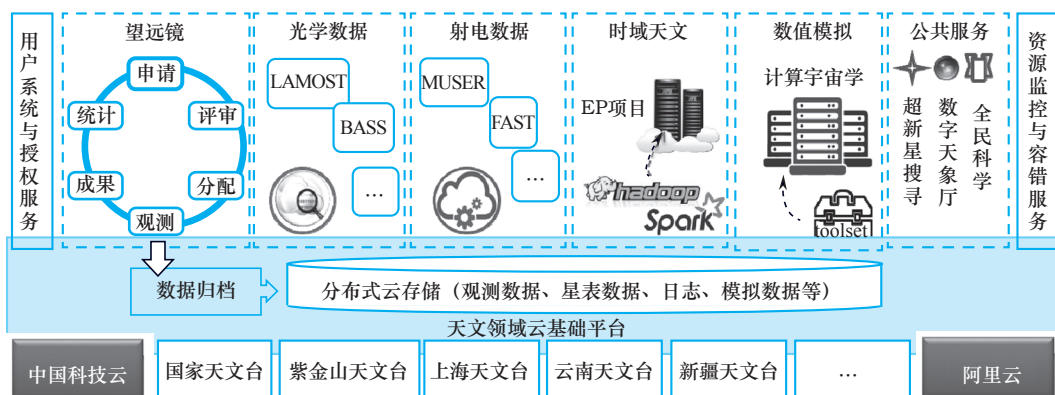


图 12 中国虚拟天文台功能结构

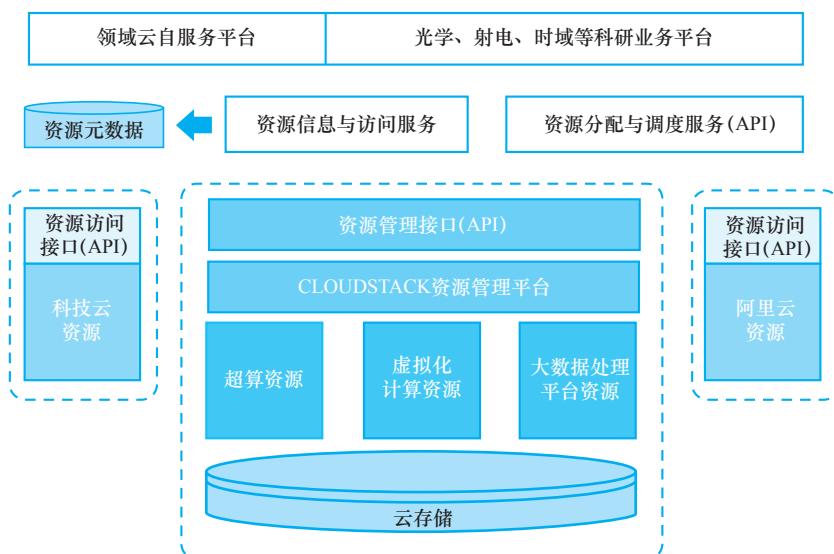


图 13 中国虚拟天文台基础平台整体框架

数据归档系统是连接观测设备与业务平台的枢纽，以定期同步的方式将各个观测台站的数据备份到基础平台的共享云存储系统，各个业务平台通过高效的数据检索接口从海量数据中快速获取所需数据，而在业务平台之上取得的各项成果反过来又会优化望远镜的观测计划和管理决策。数据归档是这个闭环的科研工作流中承上启下的关键环节。首先，通过参考 IVOA 的相关标准，完成各类观测数据元数据的规范化，建立国内天文数据的归档标准；还要根据各个台站与基础平台的网络带宽资源，设计合适的远程同步策略和副本策略，保障数据安全；最后，对于短时间内难以大规模移动的数据，在数据节点提供直接访问接口，以就近计算（In-Situ）的方式接入业务平台。

基于云存储的高效数据检索引擎是保证业务平台正常运行的关键，通过建立分布式的元数据索引，按天区位置优化数据布局，充分利用对象存储和缓存技术，快速定位数据，减少对传统关系型数据库的依赖程度，从而克服传统数据库在管理海量科学数据方

面的瓶颈，满足数据分析与处理的需要。

集成业务平台构建在基础平台之上，各系统在业务层面相互独立，虽然功能侧重点不同，但共享底层的存储、数据与计算资源。望远镜与公众服务侧重业务流程和逻辑，对资源的需求不高，而光学、射电、时域天文数据挖掘以及数值模拟计算对存储和计算资源均有较高的要求，除了提供所需的软件资源外，还要综合考虑数据和计算节点的分布，以及网络带宽情况，对各类资源进行协同调度，在保障用户对资源的合理需求的同时，提高资源的整体利用率。

基础平台为整个系统的最底层，负责集成分散的存储与计算资源，并通过虚拟化的方式为上层各业务模块提供存储与计算服务。基础平台中的存储与计算资源的集成以地域为单位建设云节点，以现有技术方案为基础进行扩展，完整集成。

中国虚拟天文台服务门户自2014年5月上线运行以来，已经发展出国家天文台（北京）、紫金山天文台（南京）、上海天文台（上海）、云南天文台（昆明）、新疆天文台（乌鲁木齐）、南京大学（南京）、阿里云（杭州）共7个节点，为兴隆LAMOST、13.7米毫米波望远镜、佘山1.56米、丽江2.4米、南山25米等10多套观测设备提供数据管理和开放共享服务；为丽江2.4米、兴隆2.16米等望远镜提供时间申请服务；为中国科学院大学和各天文台500多用户提供虚拟机等云服务；基于国内业余天文观测数据发现13颗超新星和新星；注册用户超过20 000人。2015年年初，中国虚拟天文台入选“中国科学院科研信息化十大优秀案例”。在“互联网+”大数据时代，中国虚拟天文台正在为天文学的发展发挥着越来越大的信息化支撑服务作用。

## 8 总结与建议

信息化基础设施已经成为天文学研究不可或缺的一部分。本文以FAST、LAMOST、MUSER、SVOM/GWAC、SKA这5个有代表性的重大天文科技计划为例，介绍了重大天文科技计划对信息化基础设施的需求和当前建设情况，介绍了中国虚拟天文台作为天文科研信息化公共支撑平台的建设历程和应用情况。

经过二十多年的发展，国内天文学领域科研信息化的基础设施，从科研网络、数据存储能力、高性能计算到数据应用环境等都有了一定的积累，初步满足了当前科学研究的基本需求。但距离新近落成和正在规划建设中的新一代天文观测设施对信息化基础设施的需求还有相当的差距。为充分发挥新一代重大天文科技基础设施的作用，必须及早规划、大力发展科研信息化基础设施。

加大信息化基础设施的建设和运维管理支持力度，提供更为充裕的带宽、存储、计算能力。加强天文科研信息化平台整体建设，高效管理共享天文数据以及软硬件资源，为天文学研究提供全生命周期的有力支撑。

促进天文科研信息化基础设施的均衡化发展。克服瓶颈，补齐短板。第一，高度重视观测台站、边远地区的高速科研网络建设，让新建优良台址和设备的海量数据能够顺畅地归档到数据中心并实现开放共享。第二，加大国内高校天文科研信息化基础设施和人才队伍的建设力度，让中国科学院和高校的科研信息化力量能够均衡发展和

相互促进。第三,把“中国虚拟天文台”这个行之有效的天文学科研信息化统筹协调机制从中国科学院系统扩展到高校以及其他非中国科学院的科研院所,真正成为国内整个天文领域的统筹协调机制。

天文学与信息技术的学科交叉已经成为一个不可逆转的时代趋势。2006年国家自然科学基金委员会与中国科学院开始共同设立天文联合基金,把“海量天文数据存储、计算、共享及虚拟天文台技术”列为重点支持的5个研究领域之一,为国内虚拟天文台和天文信息学的稳步发展提供了必要的支持。《2013年度国家自然科学基金项目指南》则更加明确地把这一资助方向陈述为“为解决重大天文项目所面临的数据、计算和信息提取等问题而开展的应用基础性研究,包括海量天文数据存储与共享、数据挖掘、高性能计算及虚拟天文台技术等”。2008年国家天文台-天津大学天文信息技术联合实验室成立,2015年升级为天文信息技术联合研究中心。2011年国家天文台-昆明理工大学天文信息技术联合实验室成立。2011年,“天文信息技术”作为“天文技术与方法”专业的一个研究方向被列入国家天文台2011年硕士和博士招生专业目录。天津大学计算机科学与技术专业2018年博士学位研究生招生目录的研究方向中增加了“天文信息技术”。2016年《中国大百科全书》第三版(天文卷)把天文信息学设置为一个分支学科进行词条撰写。中国天文学会正在计划设立“天文信息学”专业委员会,从而更好地推动天文学和信息技术的交叉融合发展。

## 9 致谢

感谢国家自然科学基金(11503051, 61402325),国家自然科学基金委员会-中国科学院天文联合基金(U1531111, U1531115, U1531246, U1731125, U1731243),国家科技部国家科技基础条件平台项目“国家地球系统科学数据共享服务平台”“国家基础科学数据共享服务平台”(DKA2017-12-02-07)对本文相关工作的资助。本文得到了中国虚拟天文台和中国天文数据中心提供的数据资源和技术支持。

中国虚拟天文台(China-VO)是以国家天文台为代表的中国天文界共同打造的一个网络化科学研究和科普教育资源平台,得到了中国科学院科研信息化专项、国家自然科学基金、科技部国家科技基础条件平台、北京市科委科技专项等的资助,以及阿里云、微软研究院、浪潮集团、中科曙光、北龙泽达、锐捷网络等合作伙伴的大力支持。

## 参考文献

- [1] 江绵恒. 大力发展科研信息化,服务国家科技创新. 科研信息化蓝皮书[M]. 北京:科学出版社, 2011, 1(1):1-2.
- [2] 南凯. 中国科学院科研信息化基础设施及应用. 中国科学院院刊, 2013, 28(4): 476-481.
- [3] Nan, Rendong; Li, Di; Jin, Chengjin, et al. The Five-Hundred Aperture Spherical Radio Telescope (fast) Project. International Journal of Modern Physics D, Volume 20, Issue 06, pp. 989-1024 (2011). 10.1142/S0218271811019335.



- [4] Chu, Y. Q. The Large Sky Area Multi-object Fibre Spectroscopy Telescope (LAMOST) Project. Proceedings of the 21st Century Chinese Astronomy Conference, held August 1-4, 1996. Edited by K. S. Cheng and K. L. Chan. Published by World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., P. O. Box 128, Farrer Road, Singapore 912805, ISBN 981-02-3226-8, p.155.
- [5] Cui, Xiangqun; Su, Ding-qiang; Wang, Ya-nan. Progress in the LAMOST optical system. Proc. SPIE Vol. 4003, p. 347-354, Optical Design, Materials, Fabrication, and Maintenance, Philippe Dierickx; 10.1117/12.391524.
- [6] 颜毅华, 张坚, 陈志军, 等. 关于太阳厘米-分米波段频谱日像仪研究进展 [J]. 天文研究与技术: 国家天文台台刊, 2006, 3(2): 91-8.
- [7] YAN Y, ZHANG J, WANG W, et al. The Chinese Spectral Radioheliograph—CSRH [J]. Earth Moon & Planets, 2009, 104(1-4): 97-100.
- [8] Cordier B., Wei J., Atteia J.-L., et al. The SVOM gamma-ray burst mission, 2015, published by PoS, proceedings of the conference Swift: 10 Years of Discovery, 2-5 December 2014, La Sapienza University, Rome, Italy. eprint arXiv:1512.03323.
- [9] Wei J., Cordier B., Antier S., The Deep and Transient Universe in the SVOM Era: New Challenges and Opportunities-Scientific prospects of the SVOM mission, 2016, Report on the Scientific prospects of the SVOM mission. Proceedings of the Workshop held from 11th to 15th April 2016 at Les Houches School of Physics, France. arXiv:1610.06892.
- [10] Dewdney, P. E.; Hall, P. J.; Schilizzi, R. T. et al. The Square Kilometre Array. 2009. Proceedings of the IEEE, Vol. 97, Issue 8, p.1482-1496. 10.1109/JPROC.2009.2021005.
- [11] Quinn, P.J., Barnes, D.G., Csabai, et al., 2004. The International Virtual Observatory Alliance: recent technical developments and the road ahead. in: Oschmann, J. M., Glasgow, Jr. (Eds.), Ground-based Telescopes, Proceedings of the SPIE. 5493, 137-145.
- [12] Cui, C.Z., Zhao, Y.H. Worldwide R&D of Virtual Observatory. [C].In: Jin, W.J., Platais, I., Perryman, M.A.C. (Eds.), A Giant Step: from Milli- to Micro-arcsecond Astrometry, Proceedings of the International Astronomical Union (2007) Symposium S248. 2008, 3: 563-564.

### 作者简介



崔辰州, 博士, 国家天文台信息与计算中心主任, 国际虚拟天文台联盟执行委员, 国家天文台-阿里云天文大数据联合研究中心主任, 从事虚拟天文台、天文信息学等领域的研究, 已发表学术论文 70 多篇, 主持科研项目 20 余项, 与约翰霍布金斯大学、加州理工学院、微软研究院等十多个国际一流科研机构建立有牢固的合作关系, 获得北京市科技新星计划、中国科学院“创新人才计划”、中国天文学会天文学突出贡献奖等奖励多项。

## 空间科学卫星计划的科研信息化应用

邹自明 熊森林 胡晓彦

(中国科学院国家空间科学中心)

### 摘要

“空间科学战略性先导科技专项”开启了我国空间科学事业蓬勃发展的新时代。本文首先分析了新时代环境下空间科学科研信息化的需求、机遇和挑战,然后以我国“十二五”科研信息化专项——“空间科学科技领域云”项目建设实践为例证,对其建设历程、体系结构和建设成果进行介绍,详细描述了项目建成的系统平台——日地空系统研究网络在卫星任务协同论证、卫星在轨运行支持和科学研究支撑上的应用示范和服务成效。确立了未来空间科学科研信息化的发展方向,聚焦于提升科研信息化核心要素的水平和能力,建立深度融合、泛在化的云端空间科学科研信息化应用平台。

### 关键词

空间科学卫星; 科研信息化; 空间科学领域云; 日地空间系统研究网络

### Abstract

Satellites plans in Strategic Pilot Projects in Space Science help China entered into a new vigorous space science era. Firstly, we analysis demands, chances and challenges that space science e-Science meet in the new era. Then, an example for e-Science application practice which built under the support of 12th Five-Year Plan e-Science projects – cloud in space science area is given, in which we describe its construction process, system framework, main functions and abilities in detail. Thirdly, we show some cases of STAR-Network, the system achievement of cloud in space science, service and effects on satellite mission collaborative demonstration, satellite mission operation and scientific research assistance. In near future, we will focus on improving the e-Science core elements levels and abilities, and devote to construct a deep fused, extensive cloud e-Science platform.

### Keywords

Space Science Satellites; e-Science; Cloud in Space Science Area; STAR-Network

## 1 空间科学蓬勃发展对科研信息化的机遇和挑战

### 1.1 空间科学事业蓬勃发展

空间科学是以空间航天器为主要平台,研究发生在地球、日地空间、行星际空间乃至整个宇宙空间的物理、化学现象及其规律的科学,涉及宏观、微观两大领域,着力解决宇宙和生命的起源和演化、太阳系与人类的关系等重大基本问题。卫星计划作为获取一手科学探测资料和实验数据的主要手段,是认知空间科学前沿问题的重要途径,也是世界上空间科技大国和强国的竞争高地。1970年成功发射的“东方红一号”卫星让中



国的“卫星梦”得以实现。2003年12月和2004年7月升空的“探测一号”和“探测二号”卫星让世界重新认识了中国的空间科学,利用双星探测数据,中国科学家在磁层亚暴触发、磁层顶磁场重联、辐射带和环电流探测以及磁层等离子体片波动等研究方向取得了重要发现和成果。

如果说13年前的“双星计划”揭开了中国空间科学探测的序幕,如今的“空间科学战略性先导科技专项”(以下简称空间科学先导专项)则开启了我国空间科学蓬勃发展的新时代。在空间科学先导专项(一期)的支持下,我国相继发射了暗物质粒子探测卫星(“悟空”)、“实践十号”返回式科学实验卫星(SJ-10)、量子科学实验卫星(“墨子”)和硬X射线调制望远镜卫星(“慧眼”)四颗先进科学卫星(实验卫星)。系列科学卫星任务的顺利实施,推动了科学研究与关键技术的重大突破,得到了党和国家领导人以及社会公众的广泛关注,极大地提升了我国空间科学的国际影响力。习近平主席在2016年、2017年新年贺词中,对我国系列空间科学卫星计划给予了高度评价。

目前,空间科学先导专项(二期)计划工作正有序开展,预计在2020—2022年发射太阳风-磁层相互作用全景成像计划(SMILE)、先进天基太阳天文台(ASO-S)、爱因斯坦探针(EP)、全球水循环观测卫星(WCOM)、磁层-电离层/热层耦合小卫星星座探测计划(MIT)等八颗卫星。中国空间科学的更长远的发展蓝图早已描绘:发展空间科学事业,通过科学卫星计划的实施,在宇宙的形成和演化机理、系外行星和地外生命的认知、太阳系的形成与演化过程、太阳活动及其地球空间环境的响应等方面获取重大原创发现和突破。《2016—2030空间科学规划研究报告》<sup>[1]</sup>已将“黑洞探针”计划,“天体号脉”计划、“天体肖像”计划等23个计划纳入空间科学2030年发展规划中,每个五年计划完成6~8颗新卫星任务的遴选、立项和研制,并实现前一个五年计划全部卫星的发射任务和在轨测试任务。受益于党和国家对空间科学研究发展的重视和支持,空间科学和空间科学卫星事业迎来了蓬勃发展的黄金时期。

## 1.2 卫星计划全生命周期活动科研信息化需求

科研信息化实质为科学研究活动本身的信息化,其特征是充分利用网络信息基础设施与技术,促进科技资源交流、汇集与共享,变革科研组织与活动模式<sup>[2]</sup>。刘延东副总理曾指出,科研信息化是科研现代化的必经之路,空间科学的持久创新发展同样离不开科研信息化的支撑。空间科学是一门实验性很强的学科,科学卫星作为空间移动的实验室平台,是获取科学数据的主要手段,也是驱动学科发展的原动力。空间科学的科研信息化,从某种程度上来说,就是空间科学卫星计划全生命周期活动的科研信息化。空间科学卫星计划全生命周期过程如图1所示。

完整的卫星计划过程通常包括预先概念/背景型号研究,工程型号/探测设备研制,在轨观测/地面观测,数据分析/建模/计算阶段4个关键阶段。

预先概念/背景型号研究阶段主要开展关键技术攻关,对卫星科学目标先进性、可达性以及工程任务合理性、可行性进行分析和论证。此阶段,工程与科研人员需要概念化设计、任务仿真、任务综合评估等仿真工具的支持。

工程型号/探测设备研制阶段主要进行卫星系统、科学应用系统、测控系统、运载

系统、发射场系统和地面支撑系统研制，开展地面模拟实验和系统间对接测试，期间需要通信网络、计算资源和存储资源等 IT 基础设施的支持，也需要地面模拟数据和测试数据等关键数据的支持。

在轨观测 / 地面观测阶段主要实施卫星运管和卫星下行数据处理、分发和管理，需要指令生成、载荷状态监视、数据处理、数据分发等业务软件的支持。

数据分析 / 建模 / 计算阶段主要围绕科学目标进行卫星数据的深度处理和分析，需要利用成熟算法或软件库，并结合计算模式结果或已有卫星数据进行综合分析和研究。

综上所述，卫星计划的成功实施是一个复杂、艰辛和漫长的过程。其中每个阶段的成果都是科学家团队和工程队伍智慧或先进技术的结晶，期间对科学知识、数据、仿真工具、物理模式等信息资源和存储环境、计算环境、通信网络等通用 IT 基础设施需求强烈。同时，需要科学家团队和工程研制人员协力合作，合作过程涉及跨单位、跨区域的知识交流、信息交互、文档交换、接口协调、软件共享、数据流转以及基础设施互联互通等。离开这些知识、数据、软件、基础设施等信息化环境要素的支持，卫星计划的实施变得寸步难行。

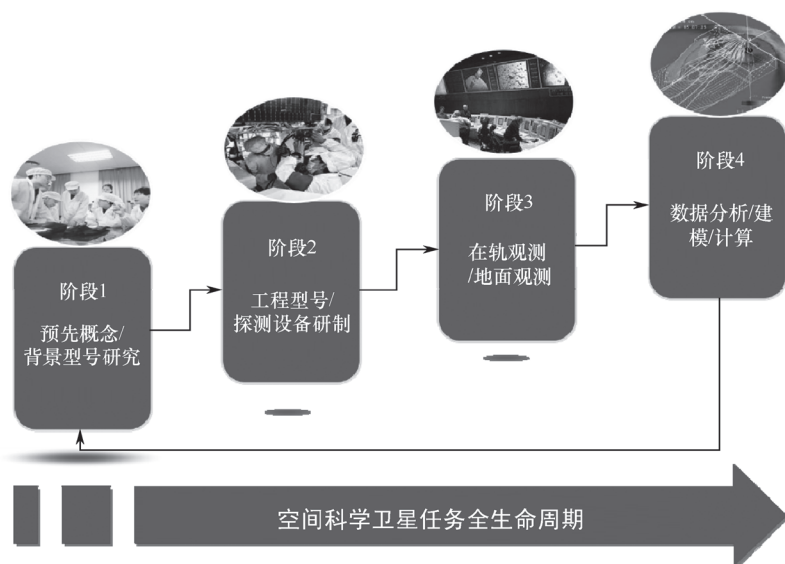


图 1 空间科学卫星计划全生命周期过程

### 1.3 空间科学科研信息化机遇与挑战并存

空间科学事业的蓬勃发展为科研信息化发展提供了契机，科学数据、计算模式、仿真分析工具和基础设施资源的基础积累为科研信息化发展创造了条件。在中国科学院信息化专项支持下，中国科学院国家空间科学中心（以下简称空间中心）建设了“空间科学虚拟观测台”数据应用环境，汇聚了“双星计划”、子午工程、风云工程、探月工程等卫星计划和地基综合监测设备获取的科学数据<sup>[3]</sup>。在国家自然科学基金和中国科学院创新性项目的支持下，空间中心积累了一批自主空间物理模式和预报模式知识库。在空间科学先导专项“空间科学背景型号项目”课题支持下，空间中心建设了交互式概念设计软件、有效载

荷覆盖分析软件、卫星外热流分析软件、卫星数据传输分析软件、仿真可视化软件等一批空间科学任务论证软件库。经过多年的持续投入和建设，中国科学院建成了高速科研网络、超级计算等科研信息化基础设施环境，可有力支撑科研信息化系统建设<sup>[4]</sup>。

在发展机遇和发展条件良好的同时，空间科学领域的科研信息化发展还存在一些短板和不足。

(1) 空间科学科研社区对科研信息化认知不够，热情不高，尚未凝聚一批稳定的科研信息化用户社区。科研活动多停留在“各自为战，自给自足”阶段。

(2) 已形成的计算模式库和软件工具库大多停留在小众化服务或内部服务阶段，通过互联网对外开放和共享程度不高。

(3) 核心科研信息化要素之间的沟通和连接不顺畅。数据与模式、工具之间无缝连接尚未建立，数据、模式、工具和超算、云计算、云存储等高性能基础设施连接不紧密。导致数据综合服务能力不强，模式计算时间开销大，软件工具使用不便捷等现实和缺陷。

(4) 尚未建立面向卫星计划全生命周期活动的统一信息化服务平台，难以满足蓬勃发展的空间科学和空间科学卫星计划的信息化需求。

## 2 面向国家重点专项需求，顺势而为的“空间科学技术领域云”项目建设

2013年年底，在中国科学院“十二五”信息化专项的支持下，由空间中心总体承担的“空间科学技术领域云”建设与应用项目正式启动，在空间科学信息化专家委员会指导下开展项目建设工作。项目面向空间科学卫星计划全生命周期活动和空间科学创新发展的科研信息化需求，旨在建设集科学数据、分析工具、物理模式等典型学科知识资源与基础设施资源于一体的空间科学领域信息化基础设施云平台，以支撑空间科学先导专项等重大任务的实施，成为空间科学创新研究院的核心研究支撑平台，促进科学成果产出，助力空间科学发展。

“空间科学技术领域云”建设思路为“资源来源于科研社区，平台服务于科研社区”。平台存储和计算资源均来自院（中国科学院）、所（空间中心）资源，知识服务资源来自所内自建或国际共享。通过对学科科研社区已有知识成果（数据、模式、软件、工具）的改造、升级和集成，建设“四平台一门户”，形成空间科学任务协同论证服务、科学卫星任务运行支持服务、空间科学大数据应用服务、空间天气计算分析服务、领域云资源服务和科技云资源在线等社区服务，通过“空间科学技术领域云”门户提供一站式在线服务（见图2）。

系统建设中，项目组选用了面向服务的架构（SOA）进行设计（总体架构见图3），其粗粒度、开放式、松耦合的服务结构，使资源和服务集成过程变得更加灵活和有弹性，各类资源彼此独立，仅通过应用结合在一起，可以独立扩展和快速升级；统一的集成标准和开放的接口协议，让系统可以动态增加和删除各类服务，可满足对未来数据资源、模式资源和工具资源等知识资源的更新和拓展需求，确保“空间科学技术领域云”可持续发展的生命力。

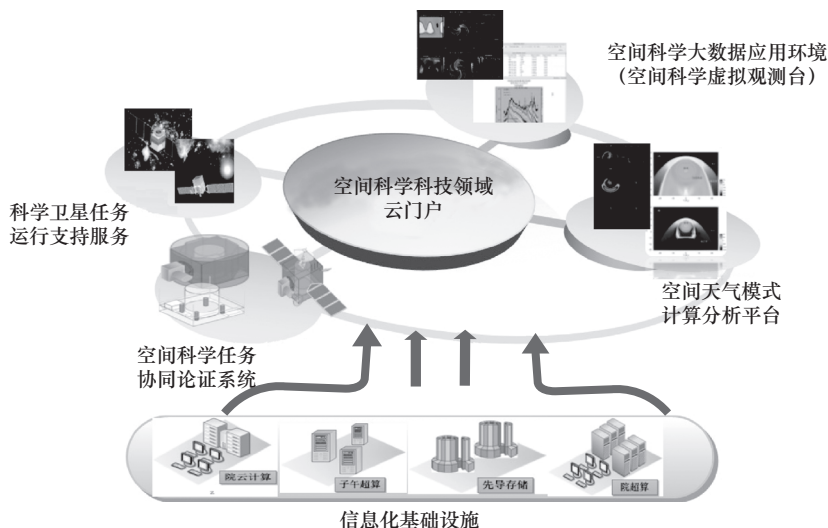


图2 “空间科学科技领域云”结构

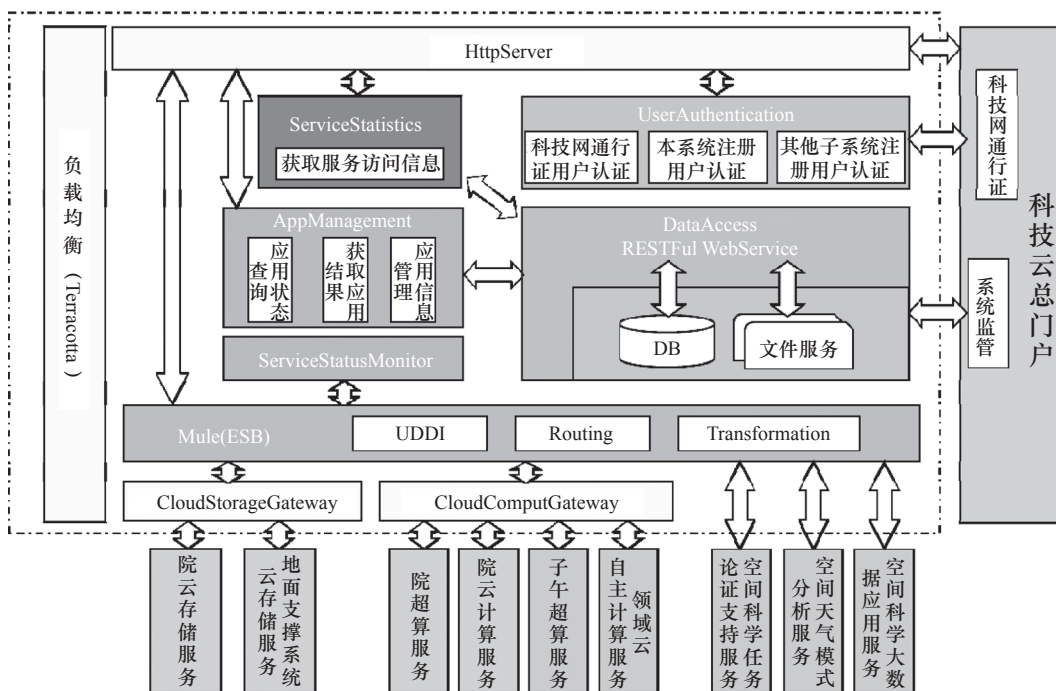


图3 “空间科学科技领域云”总体架构

在此技术框架下，通过项目组的通力合作，完成了对院、所两级基础设施资源的集成和改造，实现了支持本系统平台运行所需的存储资源和计算资源。2014年5月，基本实现了空间科学任务协同论证分析工具、空间天气计算模式、空间科学数据应用环境的改造和集成，搭建了空间科学科技领域云平台原型系统——日地系统空间研究网络（STAR-Network），并提供在线试运行服务。经过近一年的试运行和持续改进后，系统功能更加完善，性能趋于稳定，胜利通过专家现场测试。2015年12月，重点上线了科



学卫星任务运行支持服务，至此，完成了项目设计的所有功能并提供线上服务，系统正式开放（见图4）。



图4 “空间科学科技领域云”项目建设历程

3 “空间科学科技领域云”建设成果

“空间科学科技领域云”项目建成了“云环境”下的“一站式”日地空系统研究网络（STAR-Network），系统集成空间科学卫星仿真分析工具群、卫星在轨运管系统软件包、空间天气计算与分析模式群以及空间科学大数据应用分析工具。实现了科学数据、计算模式、软件工具和信息化基础设施之间的融合和互联互通。具备了覆盖科学卫星计划全生命周期的泛在服务能力，面向资源发现和可视分析的大数据应用服务能力，支持日地空间系统的物理过程模拟和关键参量分析能力和聚焦空间领域社区的信息化基础设施云服务能力（见图5）。

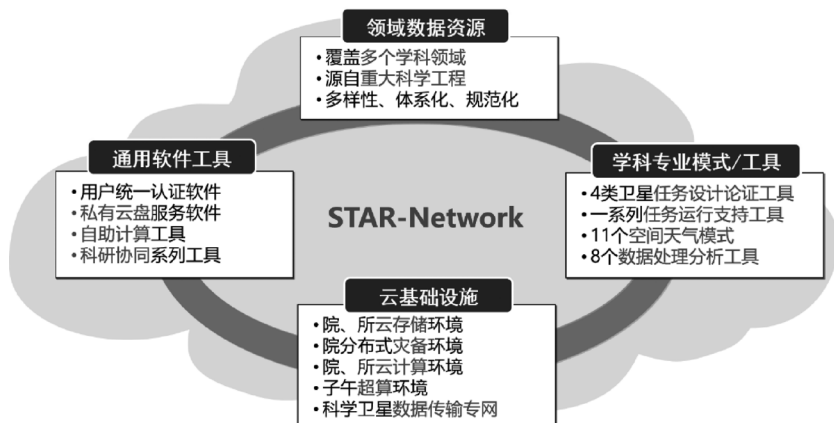


图5 空间科学科技领域云集成资源



### 3.1 覆盖科学卫星计划全生命周期的泛在服务能力

在空间科学卫星计划的前期规划和协同论证阶段，空间科学任务协同论证系统可为科学家团队提供卫星轨道交互式设计工具、卫星结构及有效载荷布局设计工具、有效载荷观测区分析工具和卫星数据传输分析工具服务（见图6）。协助科学家围绕特定科学目标，开展卫星轨道和姿态设计，空间构型、有效载荷布局，载荷有效探测区域和数据传输可行性分析等方面的协同分析和综合规划。各仿真工具能力简述如下：

（1）卫星轨道交互式设计工具具备快速卫星轨道设计、目标轨道修改，以及卫星轨道特性分析能力。

（2）卫星结构及有效载荷布局设计工具支持卫星和载荷的快速空间安装和布局，可细致展现卫星平台架构、载荷的几何外形和安装位置等内容。

（3）有效载荷观测区分析工具可根据卫星轨道、有效载荷视场、观测区定义等信息，对载荷覆盖探测空间范围开展仿真分析，给出有效观测弧段，并得出设计方案对科学目标满足度的分析结论。

（4）卫星数据传输分析工具可根据卫星轨道设计，开展数据下行传输的满足度分析，为科学数据传输可行性决策提供依据。

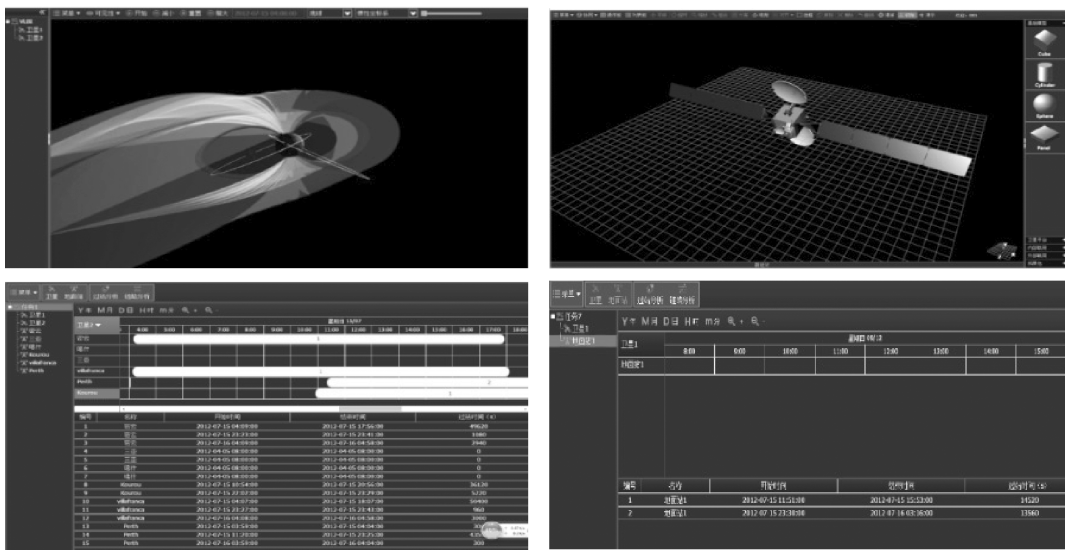


图6 卫星计划仿真工具示意图

在空间科学卫星在轨运行期间，空间科学卫星任务运行支持服务从卫星工作流和数据流两个方面提供服务，保障科学卫星观测期间的安全、稳定运行和对科学目标的观测。任务运行支持网形成了以下服务能力。

#### 1. 卫星任务态势全面扫描

为卫星系统、测控系统和科学应用系统团队用户提供了全方位的卫星任务态势信息服务，包含卫星平台运行状态概述、科学计划执行状态、星地数据传输状态以及实时空

间环境等内容。可满足卫星工程团队实时掌控卫星任务态势信息的需求，也为公众了解科学卫星整体运行情况提供了通道。卫星任务综合态势示意图如图 7 所示。

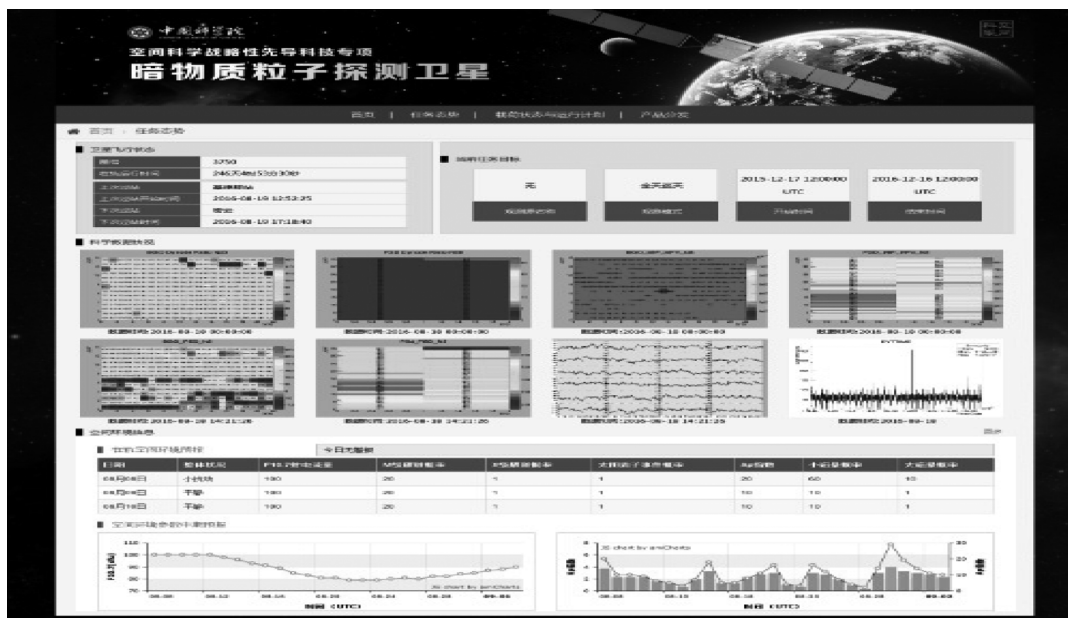


图 7 卫星任务综合态势示意图

## 2. 科学探测计划制作

为科学应用系统提供包含科学探测计划分析与生成，卫星平台轨道计算、姿态计算和过站预报等服务内容的科学探测（实验）任务规划服务，支持科学探测（实验）计划的快速而精准的制作。

## 3. 载荷状态监视

对卫星平台与载荷工程参数进行实时处理，并开展基于特定规则的参数统计，将统计结果实时提供给科学应用系统和载荷团队用户。支持用户对有效载荷健康状态以及科学计划执行状态的实时监视和评估。

## 4. 快视科学数据在线发布

面向卫星科学应用系统和载荷团队，提供包含产品在线浏览、下载功能的快视科学数据产品实时发布服务。支持科学家团队开展数据概览和快速分析，实现科学成果的快速发现。

## 5. 数据产品实时分发

面向卫星科学应用系统、卫星平台和载荷团队，进行卫星编辑级数据产品（对卫星原始接收数据进行初步处理后的产品）和辅助数据产品（含卫星星历数据、轨道根数、星地时差、探测计划）的实时分发，为科学家团队开展数据标定、数据分析和研究提供标准的数据产品输入。

### 3.2 面向资源发现和可视分析的大数据应用服务能力

空间科学虚拟观测台 (<http://vsso.cssdc.ac.cn/>)<sup>[3]</sup> 是日地空间系统研究网络提供的云环境下的数据共享和服务系统。建设有空间物理、空间天文和空间实验数据档案发布系统, 面向国内外数据用户提供科学数据产品发布与数据分析服务, 促进卫星计划科学数据的共享共用, 支持最大化的科学成果产出。“悟空”卫星的数据产品发布相关工作正积极策划中, SJ-10 试验卫星和“慧眼”望远镜数据产品尚在保护期内, 暂未公开。“双星计划”、子午工程、风云工程等国内重大项目产生的数据产品以及与世界数据系统 (World Data System, WDS) 交换的国际卫星数据资源均通过本系统持续提供在线服务。系统具备科学卫星数据和档案数据的在线检索、浏览、下载和订阅, 支持关键词检索、组合条件检索及学科导航等多类数据检索方式检查找数据。同时, 系统提供了坐标系转换、数据平滑和滤波、空间天气事件关联数据分析、单点时刻数据可视化、时间序列数据可视化等在线数据分析功能, 实现了基于云计算技术和大规模计算平台的海量数据分析能力。空间科学虚拟观测台首页如图 8 所示。



图 8 空间科学虚拟观测台首页

### 3.3 支持日地空间系统的物理过程模拟和关键参量分析能力

在进行科学卫星数据处理、分析时,需结合卫星实测数据和模式计算结果进行联合分析和讨论,获取有意义的科学成果。空间天气模式包括空间天气数值模拟模式和空间天气数值预报模式,前者用于模拟发生在日地空间的空间天气爆发过程,各区域能量耦合、波粒相互作用等复杂过程和规律,属自然科学研究。而后者用于空间环境重要参数的提前预测和预报,偏向实际应用。

空间天气计算模式分析平台集成了8个自主研发的模式和5个国际通用参考模式,提供基于服务端的模式计算结果三维可视化展示,以及个人云盘保存模式计算结果。13个模式群可有效支持发生在太阳、行星际、地球磁层、电离层和中高层大气等空间区域的物理过程的模拟或关键空间环境参数预报。

(1) L1-磁层-电离层因果链物理模式可给出计算空间范围内网格点上的太阳风密度、速度三分量,磁场三分量及热压。可支持行星际激波,弓激波、磁层顶位形,磁鞘区等离子体和磁场参数,电离层对流结构和电场特征以及磁层K-H不稳定性等研究方向的研究。

(2) 地球弓激波、磁层顶位形预报模式是一个解析模式,使用L1-磁层-电离层因果链物理模式模拟结果——上游太阳风参数为输入,可对一个完整赤道面和子午面磁层顶位形进行模拟。

(3) 太阳高能粒子传播模式以太阳爆发数据为输入,对太阳高能粒子在行星际的传播过程进行模拟和计算,实现了对空间各点高能粒子到达时间、粒子各向异性的预报。

(4) 地磁暴预报模式以地面宇宙线台网数据为输入,利用小波分析方法分析宇宙线通量变化特征,得到宇宙线通量下降幅度、不对称性对地磁暴的响应,从而实现地磁暴提前1天的预报和提前3小时的警报。

(5) 临近空间大气预报模式基于11年大气温度数据,对大气风场、温度、密度和压强进行预报,可支持中低纬临近空间大气温度、风场分布及其随地方时、季节和年际的变化的研究。

(6) 多站点中高层大气气候模式利用中层大气气候模式(MMACM)以及GSWM00模式的迁移性周日潮汐和半日潮汐(包括振幅和相位)数据,计算全球20~90km高度范围内的大气温度、密度、压强以及大气经向风和纬向风。

(7) 电离层预报模式基于电离层参数foF2(F2层临界频率)和TEC(电子总含量),对监测台站上空的电离层foF2和TEC提前一天给出较为准确的估计。

(8) 中国低纬度地区电离层闪烁模型根据日期、时间、区域代码、太阳辐射通量和地磁活动指数,计算电离层GPS-L波段闪烁指数S4大于0.1的概率、大于0.3的概率和大于0.5的概率P最可几分布。

(9) IGRF(International Geomagnetic Reference Field)是国际认可、应用范围最广的地磁场(内源场)经验模型,可用于计算地磁场偶极矩、磁倾角、磁偏角、磁场总强度等分量和L值。

(10) T96是Tsyganenko系列模型(Tsyganenko Magnetic Field Models)最广泛使用的地磁外源场模型,是建立在大量卫星观测磁场资料和一定的物理理论建立起来的半经验模型,充分考虑了太阳风条件、地磁轴倾斜和磁层顶各电流体系,可对平静状态和扰



动时期的地磁场进行模拟。

(11) 地磁截止刚度计算模式可对粒子在地球磁场运动轨迹的进行追踪, 实现了不同入射能量宇宙线粒子在磁层不同位置(不同经纬度、高度)截止刚度的计算, 可支持粒子在磁层中传播轨迹以及地球磁场的可视化显示。

(12) 行星星历计算模式根据 NASA 喷气推进实验室(JPL)提供的 DE/LE 系列行星月球历表, 计算 J2000 地心惯性系下的太阳、月球及太阳系九大行星的三维位置和速度数据, 可服务于卫星星历预报。

(13) AE-8 和 AP-8 辐射带经典模型可用于计算太阳活动极大年和极小年的电子、质子全向积分和微分通量, 质子可计算能谱范围为  $0.1 \sim 400 \text{ MeV}$ , 电子能谱范围为  $0.04 \sim 7 \text{ MeV}$ , 其计算结果可作为卫星轨道高能粒子辐射剂量评估的依据。

空间物理模式计算使用场景如图 9 所示。

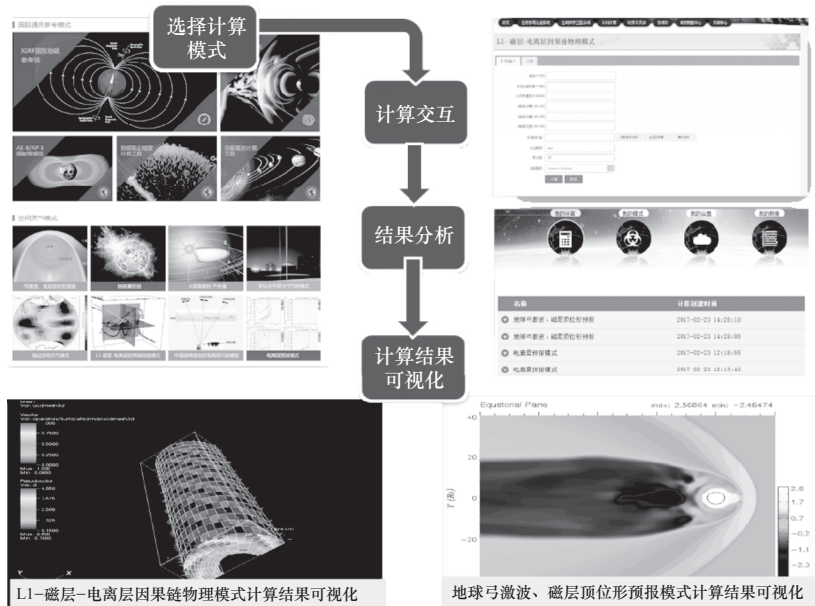


图 9 空间物理模式计算使用场景

### 3.4 聚焦空间领域社区的信息化基础设施云服务能力

通过对院、所两级超算资源、云计算和云存储资源的融合和对接, 实现了本学科领域云计算和云存储虚拟环境的搭建, 可为空间大数据分析、空间物理模式计算和仿真工具运行提供基础支持。此外, 为科研社区提供了云盘服务, 可支持系统用户申请和管理个人云盘, 创建和管理个人虚拟机, 在个人虚拟机上提交自助模式计算等。基于中国科学院分布式灾备环境建成了用于空间科学卫星数据灾备的灾备系统, 以保障卫星数据产品的永久安全。结合科技网通信资源搭建的科技专网环境, 可定向服务于空间科学先导专项数据的安全、高速传输。集成的院 Ducky 科研协同环境, 可提供团队文档库、科技网邮箱、科信 APP、会议服务平台等协同工作服务。



## 4 应用示范和服务成效

“空间科学技术领域云”项目建设中，秉承“边建设，边服务，边完善”的原则，重点跟踪以空间科学先导专项为代表的空间科学卫星计划，面向学科领域研究提供定向对接服务，取得了显著的服务效益和成果，凝聚了一批稳定的学科社区用户。

### 4.1 在空间科学背景项目任务的应用示范

为空间科学先导专项 ASO-S、EP、WCOM 和 MIT 计划以及中欧联合卫星计划 SMILE 的前期规划、初步方案设计提供了一个高效、虚拟的协同平台服务，论证分析工具的设计结果为开展卫星任务深化论证奠定了良好基础。有效支撑了 SMILE 卫星计划的正式立项以及 ASO-S 和 EP 卫星计划通过立项评审。

以爱因斯坦探针（EP）卫星计划为例，卫星科学应用系统及有效载荷团队同论证团队一起，结合日地空间系统研究网络提供的卫星轨道设计工具、卫星结构和有效载荷设计工具等工具服务，进行卫星任务协同论证与分析，围绕轨道设计、姿控、测控数传、热控、电源、空间环境、地面段等方面开展工作。空间科学任务论证系统工具支持了空间科学卫星计划设计方案的复核复算与任务级仿真分析，为卫星计划前期方案定性和定量评估提供了手段和依据，在 EP 的卫星计划通过立项评审中起到了重要作用。

### 4.2 对空间科学在轨运行卫星任务的服务成效

为空间科学先导专项（一期）成功发射的暗物质粒子探测卫星（“悟空”）、“实践十号”返回式科学实验卫星（SJ-10）、量子科学实验卫星（“墨子”）和硬 X 射线调制望远镜卫星（“慧眼”）4 个科学卫星计划的成功实施提供了坚实的基础设施支撑和系统平台保障服务（见图 10）。在卫星计划的系统研制阶段和系统联试联调阶段，日地空间系统研究网络为其提供了高速数据传输专网、云计算和云存储服务等设施服务。在“悟空”、SJ-10、“墨子”和“慧眼”卫星在轨测试和卫星长管运行阶段，日地空间系统研究网络——空间科学任务运行平台有力地支持了卫星任务运管、下行数据处理和准实时分发等业务和任务，保障了科学探测任务、实验计划和机遇观测的胜利实施。



图 10 空间卫星任务运行支持服务示意图

卫星任务运行支持服务相关系统平台有效地保障了“悟空”卫星科学数据的完整性和正确性，确保了科学数据不丢一个数据源包；为“悟空”卫星科学应用系统提供准实时的数据产品分发服务，为后续的数据标定、深加工和研究分析提供了基础数据输入，截至 2017 年 10 月 16 日（以下统计数据均采用该截止时间），向科学应用系统累计分发的数据产品（科学数据产品和辅助数据产品）超过 43TB。“悟空”现已完成三次全天区扫描，探测到超过 30 亿个高能粒子，取得了重要观测成果，观测成果论文已被国际顶级期刊《Nature》接收。

在 SJ-10 卫星的 21 天实验期间（回收舱运行 12 天，留轨舱实际运行 21 天），向 SJ-10 科学应用系统和载荷团队提供了准实时的数据产品分发服务和数据快视服务，满足了科学家团队对 SJ-10 数据产品快速处理和分析研究的要求，累计分发数据产品体量超 8.8TB。有效地配合了星上载荷实验任务的灵活调配和开展，卫星在 250km 高度的轨道空间共开展了 28 项科学实验<sup>[5]</sup>，取得了人类首次实现微重力环境下哺乳动物胚胎发育，首次观测到微重力环境下煤燃烧现象等 15 项原创实验成果。

为“墨子”科学应用系统累计分发数据产品约 1.08TB，支持了 884 次星地量子科学实验的开展（见图 11）。相关实验已取得了序列重大原创成果：国际上首次实现从卫星到地面量子密钥分发，从地面到卫星的量子隐形传态，国际上率先实现 1 200 千米的量子纠缠分发。相关成果在国际顶尖学术期刊《Science》和《Nature》上发表<sup>[6-8]</sup>。

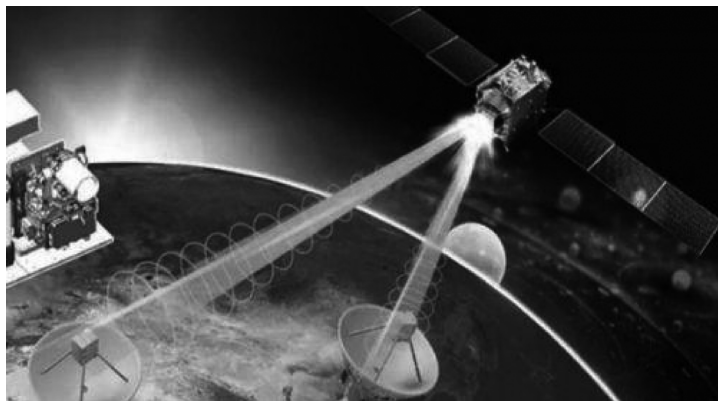


图 11 “墨子”量子通信实验示意图

“慧眼”高能望远镜在过南大西洋异常区（SAA）时，为了规避大剂量高能粒子辐射对载荷造成损害，需要定时开关机。基于 AP-8/AE-8 计算模式结果向“慧眼”提供的南大西洋异常空间环境预报服务，为高能望远镜过 SAA 区开关时机选择提供了依据，保障了卫星载荷的安全和稳定运行。在 2017 年 8 月 17 日发现的双子星合并引力波事件中<sup>[9]</sup>，空间科学任务运行平台以分钟级响应速度，为“慧眼”望远镜科学应用系统提供应急机遇目标观测计划制定和数据分发服务，在引力波发生期间，为科学应用系统分发科学数据产品总计 1 059 个，体量达 23.17GB。有效地配合了“慧眼”望远镜对引力波爆发天区进行联合观测和观测数据的快速分析（专题报道参见网站：[http://nssc.cas.cn/xwtdt2015/xwsd2015/201710/t20171018\\_4874974.html](http://nssc.cas.cn/xwtdt2015/xwsd2015/201710/t20171018_4874974.html)）。

### 4.3 在空间科学研究领域的服务成效

重点围绕日地系统空间天气基本过程及规律研究,空间天气因果链模式和预报方法研究等方向,通过空间科学大数据应用环境和空间天气模式计算平台为 973 计划、863 计划、国家杰出青年科学基金等 40 余个科研项目提供了科学数据服务、模式计算服务、标准规范服务和信息化基础设施服务。

在“中高层大气潮汐波短期变化物理机制研究”课题中,日地空间系统研究网络的大数据应用环境为项目课题组提供了 2012 年 1 月至 2013 年 12 月期间,子午工程兴隆站等 6 个台站的 OH 气辉成像仪数据,以及海南富克镇站、云南曲靖站流星雷达风场和温度数据服务和数据可视化服务。项目组利用上述科学数据开展了中-低热层高频重力波传播特性研究,在高频重力波对大气环流影响方面取得了显著成果<sup>[10,11]</sup>。

在空间天气基本过程及规律模拟研究相关课题中,为“太阳风-磁层-电离层系统时变过程的全球数值模拟研究”“银河宇宙线随太阳活动调制研究”“太阳高能粒子扩散系数研究”等项目课题组提供了 L1-磁层-电离层因果链物理模式、太阳高能粒子传播模式、地球弓激波、磁层顶位形预报模式等模式计算服务、高性能计算资源服务和 STEREO 等多卫星联合实测数据服务。有效地支撑了项目组的研究工作,项目组在缓变型高能粒子事件中粒子的扩散系数、太阳高能粒子传播过程、日地空间系统复杂空间天气连锁时变过程和耦合关系研究方面取得了重要进展<sup>[12-14]</sup>。

## 5 总结与展望

面向空间科学发展新时代的科研信息化需求,“空间科学科技领域云”项目孕育而生,在空间中心各部门的密切合作下,项目建设集成了空间科学卫星任务协同论证分析服务,空间科学卫星任务运行支持服务,空间科学大数据应用环境服务和空间天气模式计算分析平台服务,通过日地空间系统研究网络门户对外提供统一服务。日地空间系统研究网络开通运行后,凝聚了一大批稳定的科研社区用户团队,为空间科学先导专项(一期)的四颗科学卫星提供了稳定的基础设施和业务软件支撑,为卫星的稳定运行、重大研究成果产出起到了后盾保障作用。为空间科学先导专项(二期)背景型号任务规划和论证提供了仿真分析服务,有效地协助了背景型号卫星任务的方案设计和选型。为空间天气基本过程和物理规律研究课题提供了数据服务、模式计算服务和高性能计算服务,促进了空间科学研究成果产出。

未来,将遵循空间科学大数据应用发展的长远目标,着力于云基础设施、领域数据资源、大数据应用支撑平台与典型应用示范四个核心内涵。

(1) 进行基础设施环境建设。搭建柔性的计算支撑云平台,构建支持软件定义的融合存储系统,建立高速、稳定的国际通信网络。

(2) 建设深度融合的特色数据产品集。结合已有数据资源开展数据加工和融合处理,利用多源卫星实测数据,建设南大西洋异常区服务典型数据产品;发展粒子方向投掷角通量和全向通量转换算法,建设同步轨道卫星粒子辐射环境数据产品。

(3) 建立具有自主知识产权的工具群。发展空间科学有效载荷模拟器,支持对有效

载荷空间电磁辐射和高能粒子辐射通量、辐射剂量的评估,支持对有效载荷辐射响应的模拟;创建平行坐标系数据可视化工具,支持对日地空间物理区域精细结构和电磁场强度、流线的绘制。

(4) 发展数字空间引擎技术。完善时空数据组织框架下的序列计算算子,支持时空检索、关联挖掘和特征提取等功能;发展时空计算的数据组织模型,支持时空拓扑构建、时间编码方案、时空映射等功能。

(5) 研制核心系统软件。研制支持科学任务过程重构,科学任务成果呈现,机遇科学事件协同响应,测试验证与演练支持等系统软件;重点研发基于机器学习的天体目标快速识别软件和具有关键物理场多维度重构、分析能力的分析软件。

以此打造泛在化、融合化、智慧化数字空间,精准服务于未来空间科学卫星任务,促进空间科学领域的知识发现与技术创新。

### 参 考 文 献

- [1] 吴季,等. 2016—2030 年空间科学规划研究报告 [M]. 北京:科学出版社,2016.
- [2] 陈明奇,吴丽辉. 中国科学院信息化回顾与展望 [J]. 中国科学院院刊,2013(4):461-467.
- [3] 邹自明,等. 大数据时代空间科学领域的科研信息化实践与成果 [J]. 大数据,2016,2(6):83-96.
- [4] 南凯. 中国科学院科研信息化基础设施及应用 [J]. 中国科学院院刊,2013(4):476-481.
- [5] 康琦,胡文瑞. 微重力科学实验卫星——“实践十号” [J]. 中国科学院院刊,2016,31(5):482,574-580.
- [6] Liao S K, Cai W Q, Liu W Y, et al. Satellite-to-ground quantum key distribution[J]. Nature, 2017, 549(7670).
- [7] Liao S K, Yong H L, Liu C, et al. Long-distance free-space quantum key distribution in daylight towards inter-satellite communication[J]. Nature Photonics, 2017.
- [8] Yin J, Cao Y, Li Y H, et al. Satellite-based entanglement distribution over 1200 kilometers[J]. Science, 2017, 356(6343):1140.
- [9] Castelvechi D. Rumours swell over new kind of gravitational-wave sighting[J]. Nature, 2017.
- [10] 王翠梅,李钦增,徐寄遥,等. 基于多台站 OH 全天空辉成像仪观测的中国中纬地区重力波传播特性 [J]. 地球物理学报,2016,59(5):1566-1577.
- [11] 王翠梅,李钦增,徐寄遥,等. 基于 OH 全天空辉成像仪观测的中国低纬地区的重力波传播统计特征 [J]. 地球物理学报,2014,57(11):3659-3667.
- [12] Qin G, Shalchi A. Perpendicular diffusion of energetic particles: Numerical test of the theorem on reduced dimensionality[J]. Physics of Plasmas, 2015, 22(1):124027.
- [13] Wang Y, Qin G. Estimation of the release time of solar energetic particles near the Sun[J]. Astrophysical Journal, 2015, 799(1):111.
- [14] Wang J Y, Wang C, Huang Z H, et al. Effects of the interplanetary magnetic field on the twisting of the magnetotail: Global MHD results[J]. JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH-SPACE PHYSICS, 2014, 119(3):1887-1897.

### 作者简介



邹自明，1971年生，研究员，博导，中国科学院国家空间科学中心副主任，国科联世界数据系统（WDS）中国空间科学学科中心主任，空间科学先导专项科学卫星工程地面支撑系统总指挥兼总设计师。先后主持了空间科学先导专项、载人航天工程、973计划、863计划、子午工程、科技部科技基础条件平台和中国科学院科研信息化专项等计划科研项目十几项。在空间环境预报及信息系统、空间科学卫星地面应用系统、数字空间、云计算和大数据等方面开展了深入研究。获军队科技进步一等奖两项，发表论文三十多篇，合著专著一部，荣获中国科学院载人航天工程重要贡献奖，被授予“中国科学院参加载人航天工程优秀工作者”荣誉称号。



# 南极巡天望远镜 AST3 在引力波电磁对应体探测中的应用

王力帆

(中国科学院紫金山天文台南极天文研究中心)

## 摘要

南极巡天望远镜 AST3 是我国放置在南极最高点冰穹 A 的三台大视场光学 / 红外巡天望远镜。紫金山天文台和中国科学院南极天文中心牵头的中国南极天文合作团队自主研发的 AST3 望远镜软、硬件系统, 实现了在极寒条件下持续高可靠性的远程全自动巡天观测, 这是南极独一无二的首台全自动巡天观测望远镜。AST3 团队利用南极极夜极佳的观测条件, 开展了包括引力波源、快速射电暴、超新星、系外行星等一系列时域天文方面的研究。近年来随着引力波及其电磁对应体的发现, 正式开启了“多信使天文学”时代。在全球信息快速共享、快速响应、多信使、多波段全球联合观测的大背景下, AST3 团队协同合作, 自主创新, 取得了一系列喜人的科研成果, 并成功实现了对首例双中子星合并引力波源 GW170817 光学对应体 AT2017gfo/SSS17a 的观测。

## 关键词

南极; 巡天望远镜; 暂现源; 引力波

## Abstract

Chinese Antarctic Survey Telescopes AST3 consist of three large field of view optical/Infrared survey telescopes placed at the highest point in the Antarctic dome A. Chinese Antarctic astronomy collaboration team led by Purple Mountain Observatory and Chinese Center for Antarctic Astronomy, has developed independently hardware and software system of AST3 telescope, and realized the continuous and highly reliable remote automatic observation on the extreme cold condition. AST3 is the first unique full automatic Survey Telescope in the Antarctic. Benefit from the excellent observational conditions in Dome A, AST3 team have carried out a series of time domain astronomical research using AST3 telescope, including searching for gravitational wave sources, fast radio bursts, supernovae, exoplanets, etc. Recently, the discovery of gravitational waves and their electromagnetic counterparts have initiated the era of multi-messenger astronomy. In the context of global collaboration and data sharing, fast response, multi messenger and multi band global joint observation, AST3 team has made a series of achievements in collaboration and independent innovation, and we succeeded in detecting the first electromagnetic counterpart of the binary neutron star merger event GW170817.

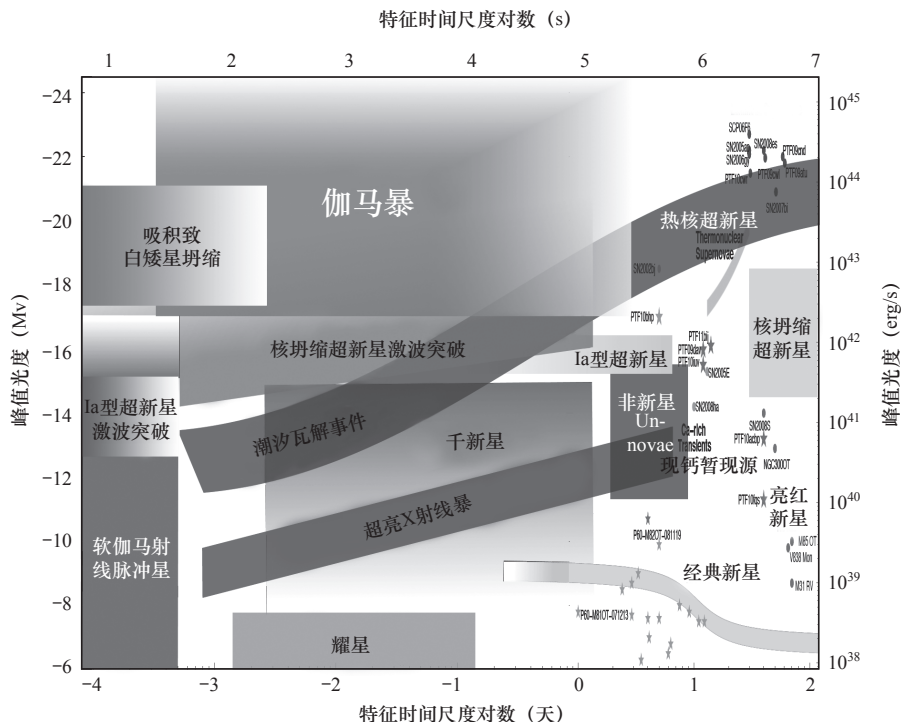
## Keywords

Antarctic; Survey Telescope; Transient; Gravitation Wave

## 1 背景

安装在南极冰穹 A 的南极巡天望远镜 AST3 是由我国自主设计、制造的大视场巡天望远镜, 由中国科学院紫金山天文台、南京天文光学技术研究所、国家天文台、清华大

AST3 的主要科学目标是利用南极极夜连续一百多天的全黑夜和得天独厚的天文观测条件, 搜寻引力波源、快速射电暴、超新星、伽马暴等暂现天体, 开展时域天文方面的研究, 探索包括宇宙暗能量、暗物质、黑洞、太阳系外行星等不同宇宙尺度的关键科学问题。暂现源搜寻是 AST3 的主要任务之一, 大多数的暂现源暴发的物理机制所对应的光变周期对应毫秒到小时级别很短的时间尺度 (见图 1)。例如, 在小于 1 天的时间尺度上, 已知的暂现源就有快速射电暴、引力波源<sup>[5,6]</sup>、超新星激波突破、ICECUBE 高能中微子、伽马射线暴、Ia 型超新星、极亮 X 射线源、耀星和典型新星, 等等。要揭示这些特殊天文现象的物理机制, 我们迫切需要更短时间尺度的观测数据。然而迄今为止, 对于短时标暂现源, 依然没有系统的观测和研究结果。其中主要的困难, 一是短周期数据很难获取; 二是一些暂现源定位比较困难, 需要大天区大视场的巡天; 三是即使取得数据, 需要马上做实时的数据分析, 以便立即跟进做光谱和影像观测, 这对已有的数据处理技术提出了严峻的挑战。例如, 第一例引力波源 GW 150914<sup>[6]</sup>, LIGO 的空间

图 1 不同物理机制暂现源的峰值光度与时间尺度的关系<sup>[21]</sup>

定位误差达到 600 平方度。要提高定位精度，提高找到引力波源等短时标暂现天体的概率，就需要开展全球协作，利用全球信息通信网络，将多个引力波探测器、全球各个波段的望远镜联合起来进行协同观测。现代天文学已经发展到了一个快速共享信息和数据、全球联合协作的时代。

在伽利略时代的天文学研究，人们观察宇宙的唯一方式只有可见光，可见光观测不仅受到天气条件的制约，所获得的信息也受到可见光载体的限制。随着现代科学的发展，人们认识宇宙的手段逐渐增加，开始利用 X 射线、无线电波等来探测宇宙。X 射线、可见光、无线电波都是电磁波，只是波长不一样。通过不同波段来研究同一个天文现象，可以得到更深刻的认识，“全波段天文学”从此应运而生。引力波的发现，让我们又多了一种探测宇宙的工具，引力波作为时空的波动，是与电磁波本质不同的物理现象。引力波和电磁波作为不同的“信使”，可以告诉我们同一个天文事件不同方面的信息。最近一次的双中子星合并的引力波事件 GW170817，正是一次全球协作的完美典范，开启了“多信使天文学”的新时代<sup>[7]</sup>。2017 年 8 月 17 日，LIGO 和 VIRGO 共同探测到持续时间为 100 秒左右的新引力波事件 GW170817<sup>[5]</sup>，这是人类首次直接探测到双中子星并合产生的引力波事件。在引力波并合信号发生后的 1.7 秒，美国宇航局的 Fermi 伽马射线卫星和欧洲的 INTEGRAL 卫星都探测到了一个极弱的短时标伽马暴，被命名为 GRB170817A<sup>[7]</sup>。Fermi 卫星对该伽马暴的触发时间为世界标准时间当天的 12 时 41 分 06.47 秒（北京时间当天晚上 20 时 41 分）。这是人类首次将电磁波信号与引力波信号毫无疑问地联系在一起。Fermi 卫星的伽马暴探测器在探测到伽马暴信号 GRB170817A 之后，自动向 GCN 系统发送了相关警报。因为 LIGO 的自动数据分析耗时大概 6 分钟，所以信息发布时间比 Fermi 卫星稍晚一些。当 LIGO 团队确认之后，也立即向其签订合作协议的组织发布了警报。在得到这一消息之后，全球有超过 50 台天文设备对 GW170817 开展了精细观测。南极巡天望远镜 AST3 合作团队利用正在南极运行的 AST3-2 也对 GW170817 开展密集观测<sup>[8]</sup>。AST3 团队也是深、宽场巡天（Deep Wide Field, DWF）的合作团队。双方联合利用几乎澳大利亚所有望远镜以及欧洲南方天文台的 8 米大口径望远镜对 GW170817 从光学到近红外进行了观测。AST3 团队由此获得大量有关 GW170817 的重要数据，最后成功观测到了位于星系 NGC4993 中的引力波光学对应体，编号为 AT2017gfo/SSS17a<sup>[9]</sup>。在这次的双中子星事件中，LIGO 和 VIRGO 的三个探测器协同观测（见图 2），最终将产生源定位在 28 平方度的范围之内。正因引力波空间定位精度大大提高，电磁波段所探测到的信号其空间证认才成为可能。

进行全球协同观测，需要快速响应。引力波等暂现源持续时间都非常短，常常是毫秒量级，必须在短时间内进行初步的数据处理，然后将候选体位置信息通过全球信息系统发布给其他观测者进行后随观测。例如，伽马暴的 GCN 邮件系统，一旦某个卫星探测到伽马暴信号，将会以最快速度把伽马暴的位置信息发送到此系统中，订阅了该邮件系统的其他观测者即时收到提示，立即开展后续的观测。此次费米卫星正是利用此系统，将观测信息以最快的速度通知给了全球的很多组织，随后才有众多望远镜纷纷加入观测。LIGO/VIRGO 组织与全球近 70 个观测组织（中国有将近 10 个组织）签订了备忘录合同，一旦引力波信号被探测到，也会通过其特有的渠道传递相关信息。现代的高精度大视场巡天产生的数据量非常庞大，如 AST3 望远镜每天的数据量在百 GB 量级，2016 年观测季的数据量达到了 20TB，如果当地的计算机能力无法实时分析数据定出暂

现源候选体，需要传输到其他运算能力强大的计算机上进行处理的话，数据传输过程本身就会造成整个短时标暂现源搜索速度的瓶颈。所以大数据背景下，快速响应的要求对数据快速处理提出了巨大的挑战。

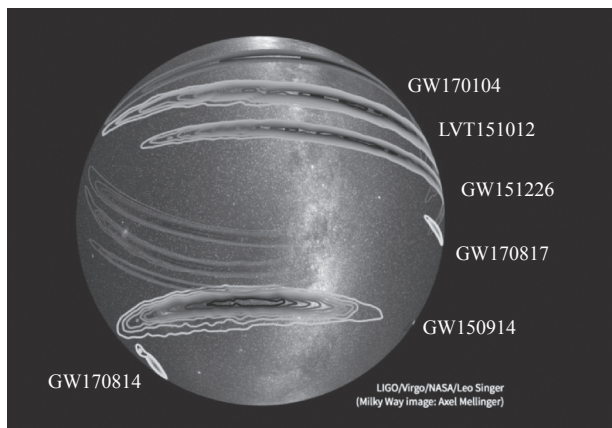


图2 LIGO 组织探测到的五次引力波事件空间定位图

注：GW150914、LVT151012（疑似引力波事件）、GW151226、GW170104 由 LIGO 单独探测，2017 年 8 月 VIRGO 加入以后，大大提高了空间定位精度，GW170814、GW170817 由 LIGO-VIRGO 联合探测（来自 <https://www.ligo.caltech.edu>）。

## 2 科研信息化在 AST3 硬件控制、观测数据处理上的应用

### 2.1 AST3 选址的特殊性和设计上的困难

AST3 望远镜安装在南极的冰穹 A，该处是南极内陆的最高点，海拔 4 093 米，全年有 135 天的连续全黑夜，是目前地球上能够连续观测时间最长的站点，这一条件可以和宇宙空间相媲美，对观测变星获得连续完整的光变周期具有无可比拟的优势。冰穹 A 地区也是地球上温度最低的区域之一（已测到最低温度  $-82.5^{\circ}\text{C}$ ），寒冷干燥，水汽含量小于世界上任何其他台址，人工光源干扰最少，大气中尘埃少，大气透过率高，平均风速小于 2 米 / 秒，大气湍流少，具有极高的视宁度，红外背景辐射比通常站址低 10 倍以上，这使得高灵敏度热红外观测成为可能<sup>[10, 11]</sup>，如图 3 所示。

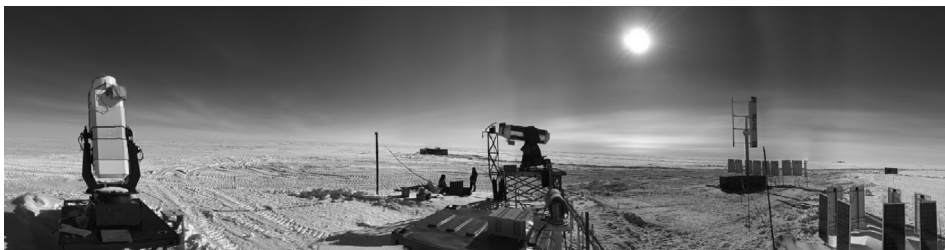


图3 第 32 次南极天文科考后天文现场



AST3 需要工作在其他站点没有经历过的极端低温下，通过铱星的卫星网络远程控制实现整年无人值守持续工作，所以 AST3 对极寒条件下的可靠性提出了极高的要求，这是对我国天文望远镜制造工业的一大挑战。在望远镜的硬件制造上，AST3 团队刻苦攻关，解决了一系列前人从未面临的难题——完成了 AST3 望远镜大视场短筒消畸变光学系统的设计<sup>[12]</sup>；通过远程实时监测镜面与环境的温差，获得与南极环境温度动态适应、节能可靠的镜面加热防霜方案，解决了极夜观测过程中镜面结霜的难题；增加了望远镜外镜面主动吹风装置，用于 ITO 镜面加热膜（见图 4）防霜的备份方案；镜筒内部也增加了热风装置，以备极端环境下镜筒内部光学镜面出现结霜情况。通过温控设计，解决了高精度光电编码器不能应用于低温环境的难题，不仅可在南极巡天望远镜上应用，还为“十二五”天文大科学装置 2.5 米 KDUST 望远镜<sup>[14,19]</sup>做了技术验证；研制实现了光学间隔自动温差补偿的机构和精确调焦机构；还通过焦面改正镜组前增加一块平面反光镜的方法（见图 5），解决了 CCD 发热引起的镜筒视宁度问题和 CCD 维护困难问题；在软件上，开发了望远镜的本地控制软件和远程控制软件（见图 6）。控制软件主要用于望远镜的调试、巡天观测、远程指令解析和发送、错误处理等功能的实现。调试部分即通过软件对望远镜驱动系统、温控系统及调焦系统等进行控制和调试；观测部分即通过软件实现望远镜按照设定目标自动运行。AST3 团队建立了一套全面、灵活的多层指令系统<sup>[13]</sup>。



图 4 非球面改正板的镜面 ITO 镀膜

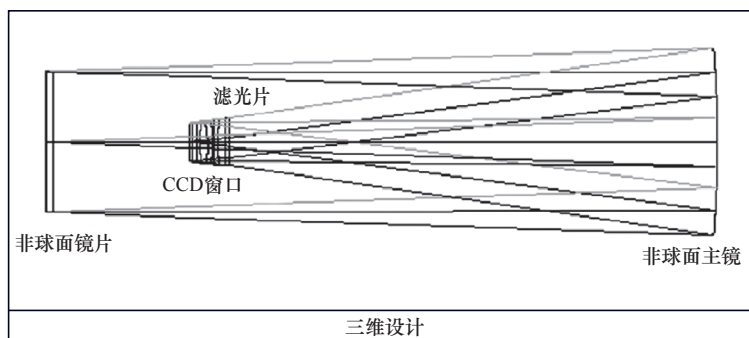


图 5 AST3 光路图



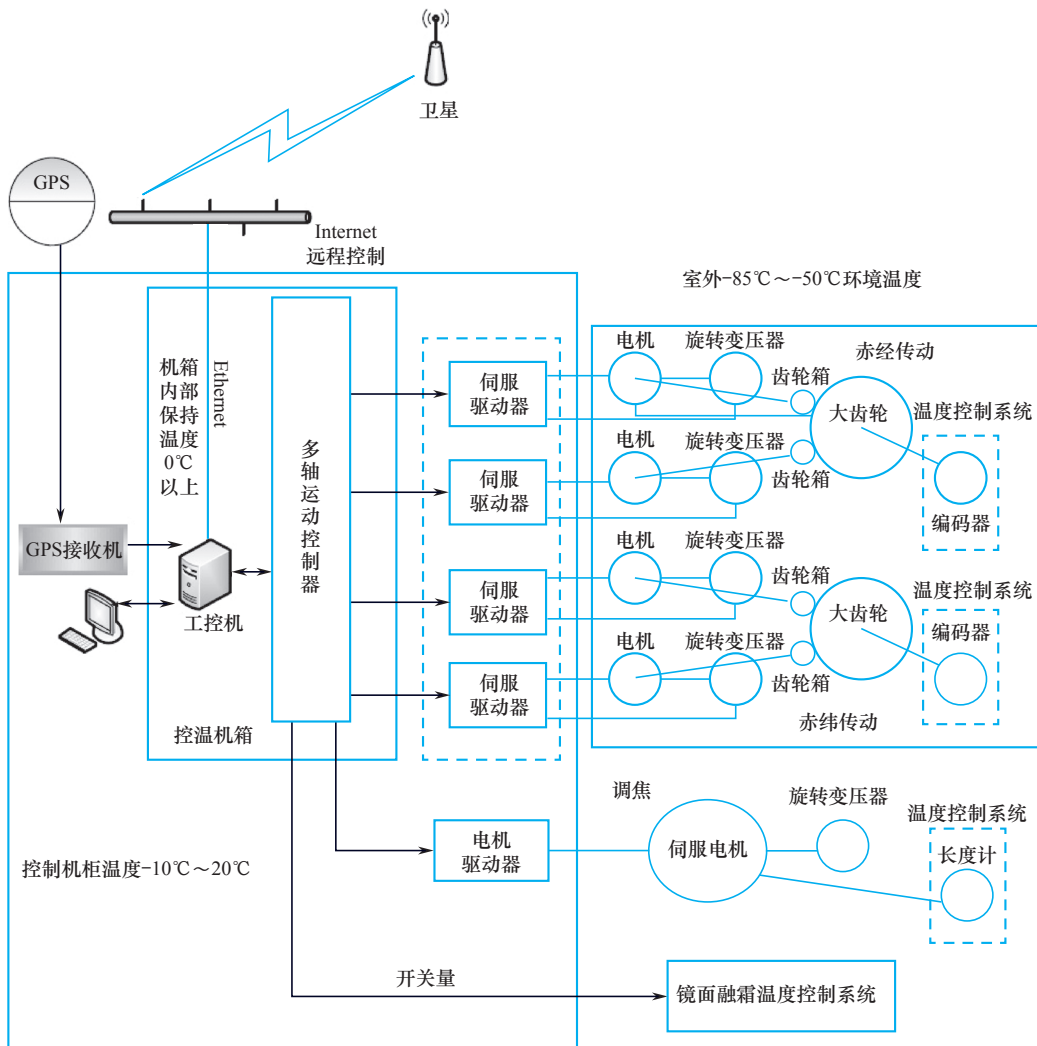


图 6 望远镜控制系统框图

2.2 AST3 的 CCD 相机

在 mmag（毫星等，1%）量级的高精度测光上，误差主要来源于仪器的稳定性，为此必须对仪器特别是探测器的性能有详尽的了解。AST3 的相机系统采用了美国 STA 公司的 10k×10k 帧转移 CCD 相机（见图 7），AST3 的科学家们对其进行了详细的性能测试，以更准确地确定观测曝光参数和进行后续图像处理，测试内容包括线性、增益、满阱电子数、读出噪声、暗流、电荷转移效率等<sup>[15, 16]</sup>。利用光子转移曲线（Photon Transfercurve, PTC，即方差 - 信号图）的斜率倒数得到增益为 1.64 e/ADU（见图 8），从信号随时间的增长曲线（见图 9）可以看出，在 60 000 ADU 以内线性好于 1%，其满阱约为  $1 \times 10^5$  电子。利用过扫描（Overscan）区域的统计得到其读出噪声为：慢读（40 秒）4e，快读（2.5 秒）11e。在 -80℃ 下，CCD 暗流为 0.09 e/pix/sec。利用 Extended Pixel Edge Response（EPER）方法，即过扫描区域前几列的残留电子数，得到电荷转移效率为 0.999 999。



图 7 AST3 的 CCD 相机

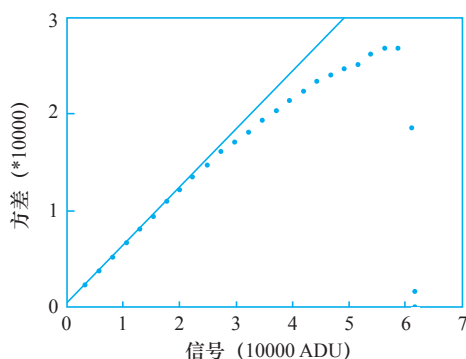


图 8 AST3 CCD 的光子转移曲线

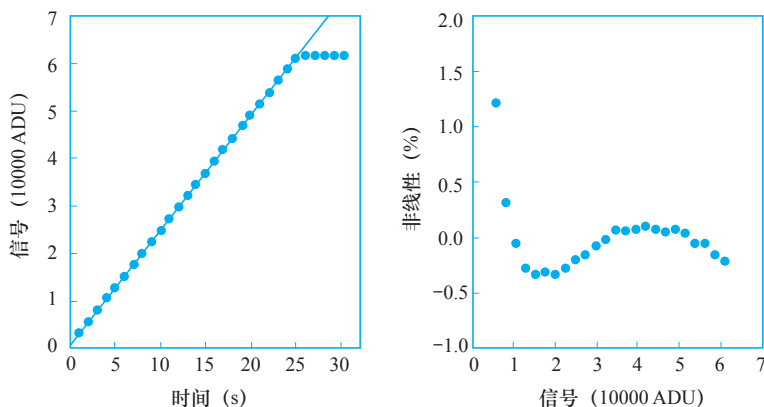


图 9 AST3 CCD 量子响应的线性测试结果

在对 AST3 CCD 的测试中, AST3 的科学团队发现光子转移曲线随信号强度变大而表现出越来越明显的非线性, 用二次曲线能得到更好的拟合 (见图 10)。用二次曲线的线性项系数比直接用低信号区域的线性拟合能更精确地计算增益, 两者相差约 10%。对该现象的原因, 通过不同像素间信号值的相关性分析发现, 相邻像素的信号值不再互相独立, 而是随着信号的增强表现出越来越明显的相关性。这是由于像素中累积电子的库仑力对后来电子的排斥而造成的电荷分享, 研究团队进一步提出了电荷分享点扩散函数 (Charge Sharing PSF) 的概念<sup>[16]</sup>, 直接将这种器件效应用观测图像上常用的点扩散函数 PSF

来描述，并发展了从实验室平场图像中计算电荷分享点扩散函数的方法，预言对星像点扩散函数的改变及对测光的影响。由图 10 可以看出，由于信号越强电荷扩散越严重，且垂直方向（即读出方向）比水平方向更强，星像中心变暗四周变亮，且垂直方向更明显，综合来看使得星像变宽并被拉长。该效应使得不同亮度的星有不同的点扩散函数，即影响测光，也为高精度形状测量引入了系统 bias，如弱引力透镜中的星系形态变化测量。

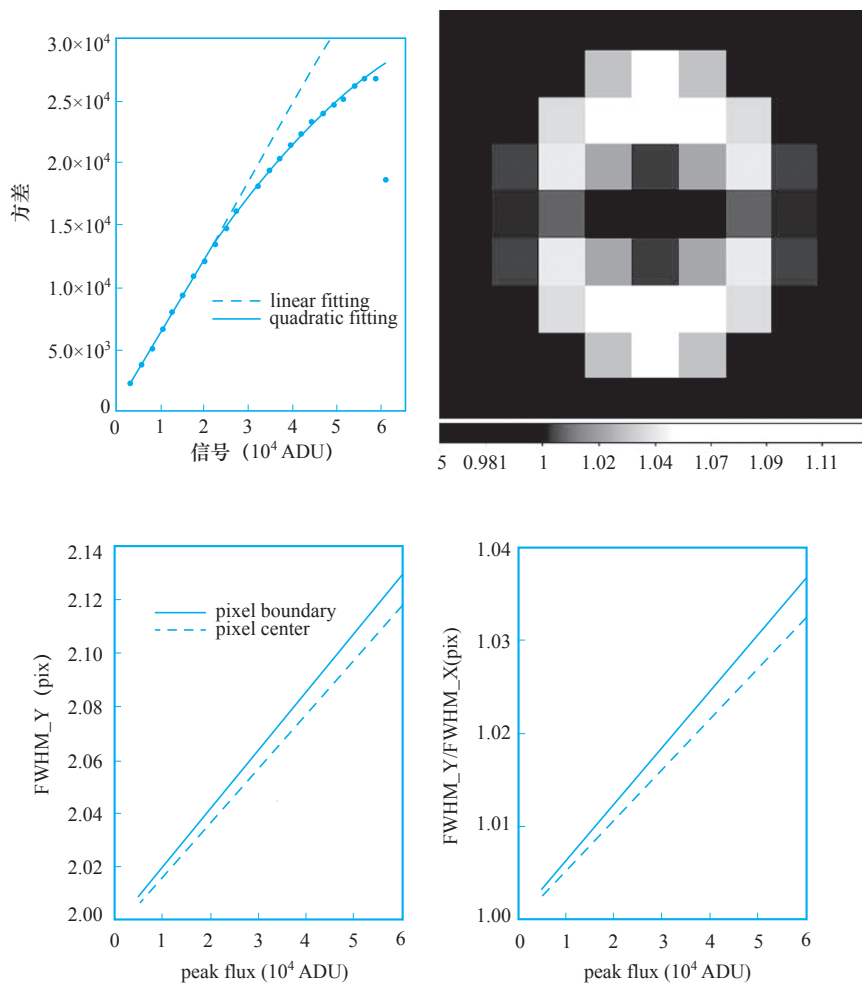


图 10 左上：光子转移曲线的非线性随信号增大而增加；右上：电荷分享点扩散函数前后星像的流量之比，中心减弱、边缘增强，Y 方向拉长；左下：电荷分享点扩散函数对不同峰值流量星像 FWHM 的影响；右下：电荷分享点扩散函数对不同峰值流量星像椭圆率的影响

### 2.3 AST3 运控系统

为了高效率地利用 AST3 获取海量的观测数据，AST3 团队研发了 AST3 的运控系统<sup>[17, 18]</sup>。相比于在基建成熟的普通天文台址运行的望远镜的运控系统，AST3 的运控系统研制需要面对南极低温低压环境、极夜期间无人值守对设备高可靠性的要求、运控系统功耗预算仅为 200 瓦特等站点条件带来的特有困难。AST3 团队自主创新，解决了上

述各种南极的特殊问题，研发的 AST3 运控系统（见图 11）实现了望远镜在南极昆仑站的无人值守条件下的全自动巡天观测。



图 11 AST3 运控系统第一代（左）和第二代（右）

### 2.3.1 运控系统硬件

第一代 AST3 运控系统包含主控系统、数据实时处理系统和数据存储系统这三个子系统。为了防止单点失败导致整个运控系统无法使用的灾害发生，每个子系统都设计有冗余备份机。主控系统负责望远镜控制指令发送、CCD 图像采集和分发以及电源分配，处理系统负责实时处理从主控发送来的观测数据，存储系统负责硬盘管理和数据存储。主控上的电源分配单元每一路开关都由两路芯片控制的电路并联，从而进一步提高系统的稳定性。

存储系统使用 PCIe Raid 卡和端口复用器，使得一套存储系统可以连接 40 块 1TB 的硬盘，40TB 的总容量满足了 AST3 一年的需要。存储系统在使用时一次只开启一块硬盘，这个技术使得存储系统实际功耗仅为 30W，不到市面上能购买到的同容量商业存储服务器的 1/20。

AST3 运控系统在投入使用后，AST3 团队根据从安装和运行得到的反馈对运控系统做了进一步的优化，研制了第二代 AST3 运控系统。在第二代运控系统中，添加了电源分配单元子系统（PDU），将主控系统中负责电源开关和温度采集的功能独立出来，使得运控系统更加模块化。电源分配单元可控 32 路开关，是第一代运控系统的 2 倍；最多可以连接 16 路温度传感器，比第一代多 4 路；电源分配单元还添加了对每一路开关电压电流采集的功能。同时，AST3 团队也将运控系统电源输入输出和温度采集接口进行了统一，方便了科考队员在现场的安装工作，大大降低了连线错误的可能性。将第一代运控系统中使用的 1TB 硬盘更换成更大容量的低温低压性能尤为优越的 8TB 充氦气盘，不仅满足了本项目中系外行星搜寻对硬盘容量的需求，还进一步提高了运控系统的可靠性。

第一代 AST3 运控系统结构示意图和第二代 AST3 运控系统结构示意图分别如图 12 和图 13 所示。

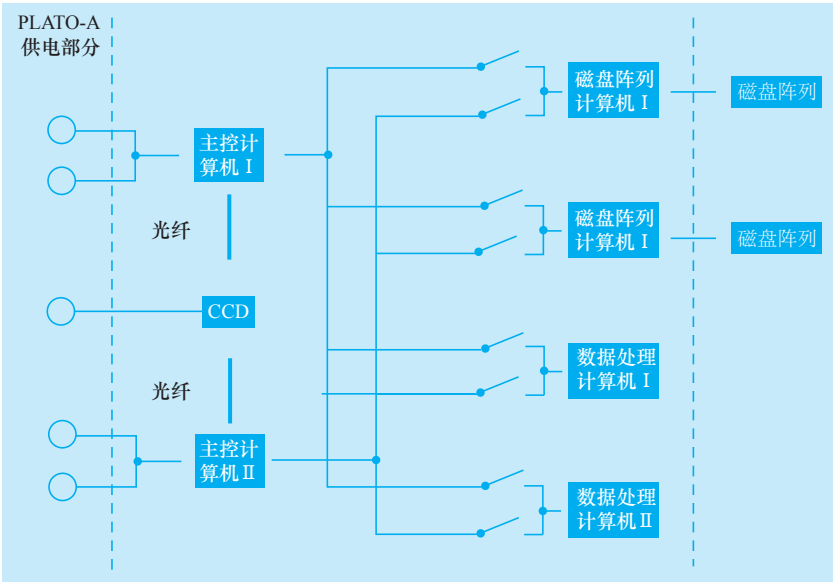


图 12 第一代 AST3 运控系统结构示意图

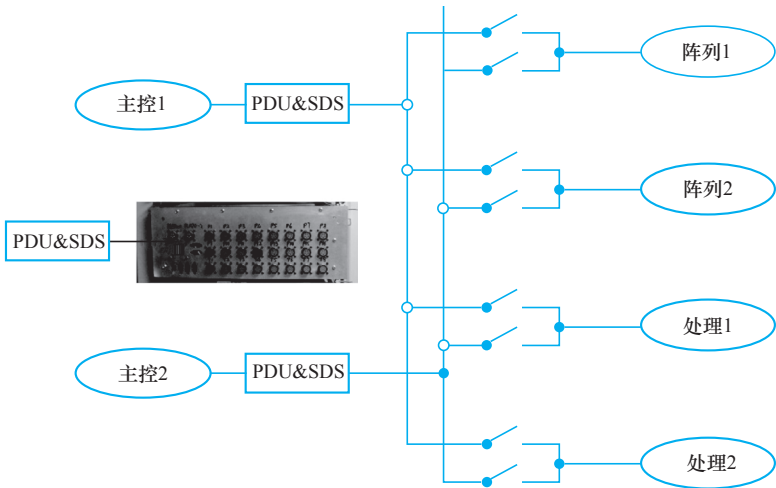


图 13 第二代 AST3 运控系统结构示意图

特别地，2017 年 2 月研究人员发现 AST3 运行数据实时显示网站上 CCD 的数据没有实时更新，团队成员远程登录检查发现主控系统与 CCD 失去连接，同时在实时数据显示网站上发现在 CCD 失联之前，CCD 图像采集卡芯片温度突然升高至 90° 以上。经过讨论，判断是 CCD 图像采集卡损坏（宇宙线、老化等原因），决定切换到备用主控系统上。切换后，CCD 恢复连接，至今仍正常工作。利用两台计算机控制一台 CCD 相机，是 AST3 团队独创的技术。这是 AST3 团队为解决无人值守条件下可靠性问题而做的各种冗余设计中的一个。



这个事例充分验证了 AST3 运控系统的冗余设计在无人值守条件下的极高的可靠性。

### 2.3.2 运控系统软件

AST3 团队为 AST3 运控系统硬件研发了定制的软件，AST3 运控系统软件包含守护进程、基本命令和巡天脚本三个部分。守护进程是计算机开机后一直在后台运行的程序，它们直接操作 AST3 运控系统的硬件，每一个守护进程实现 CCD 图像采集、传感器数据采集和电源开关控制、数据接收和存储、系统日志记录等中的一种功能。基本命令是守护进程、望远镜控制程序和 CCD 控制程序（由 CCD 生产厂商 STA 提供）的客户端程序。用户通过基本命令执行运控系统中的一项操作。巡天脚本程序集成基本命令，在软件层面上通过控制 AST3 获取观测天区坐标、望远镜指向跟踪、CCD 曝光和采集图像、图像分发处理和保存等，实现了这一整套望远镜无人干预全自动运行的功能。

AST3 团队还在自动观测程序中添加了短信报警功能。当自动程序探测到望远镜出现无法由程控自动恢复的错误时，会将报警信息通过 AST3 团队开发的数据传输系统传回国内服务器，并触发服务器将该报警信息通过手机短信发送给相关设备的负责人进行远程干预。

运控系统软件设计时，充分考虑到了可扩展性。AST3 运控系统硬件优化升级后，AST3 团队只需要修改少量的代码和守护进程的配置文件，运控系统软件就可以在新的硬件系统下使用，大大提高了工作效率。

## 2.4 AST3 巡天策略

为了提高望远镜的使用效率，节约观测时间以及实现自动巡天，AST3 团队研发了 AST3 专用的巡天策略程序。第一版巡天策略程序会根据当前时间、望远镜的当前位置、目标天顶距、目标与月亮的距离等参数，从巡天目标天区中选择最佳观测目标。自动巡天脚本程序调用巡天策略程序获取下一次计划观测的目标天区。巡天策略天区模拟图如图 14 所示。

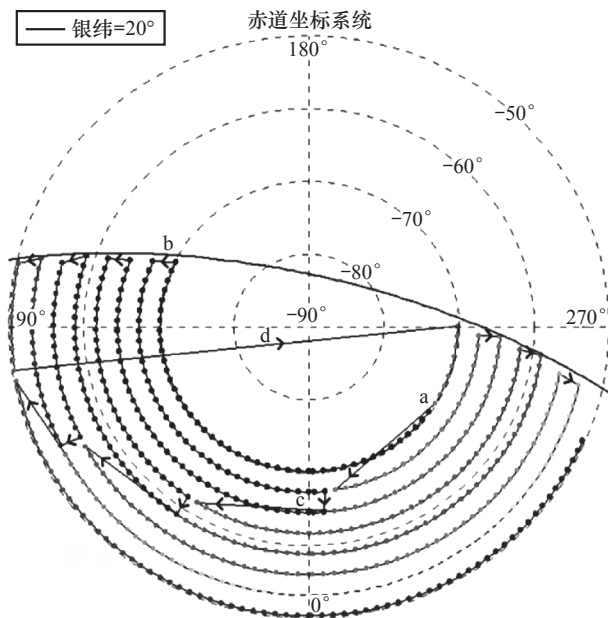


图 14 巡天策略天区模拟图

高精度的测光离不开优良的平场图像。为此，AST3 团队进一步优化了巡天策略程序，增加了自动 twilight 平场观测功能。当太阳高度在程序设置的范围之间时，巡天程序会选择合适的平场观测坐标和曝光时间。通过调用巡天策略程序，自动巡天脚本程序会在每天巡天开始前和结束后拍摄平场，供后续离线高精度测光使用。

巡天策略充分考虑了不同科学目标的需求，针对超新星巡天和系外行星搜寻，分别设定了观测模式，配合巡天程序，可以自动地进行望远镜的开启和关闭、巡天模式选择、巡天天区选择等工作。同时，为了增强 AST3 观测的灵活性，巡天策略也设定了一个灵活的特殊观测模式，可以随时插入有时效性要求的特殊天体的观测（如 GRB、超新星等），并在观测完成后自动返回，继续未完成的巡天观测。巡天策略是实现自动巡天的一个关键组成部分。

## 2.5 AST3 数据处理

### 2.5.1 南极本地数据处理

在暂现源巡天中，为尽快发现瞬变源候选体开展后续观测研究，需要对图像进行实时处理，而由于南极数据通信的铱星系统带宽窄、费用高，处理只能在现场进行。AST3 团队为 AST3 定制了低功耗、高性能的处理计算机，并开发了整套数据处理 pipeline。数据处理流程如下。

- overscan 区：对 16 个过扫描区域使用整体求中值的方法进行测量，然后将对应区块的数据扣掉这个中值即可。
- 图像改正（overscan、暗流、平场）：为节约计算时间和电力，南极本地不做暗流改正。平场改正使用每年 3—4 月存在 twilight 时拍摄的平场图像进行处理后得到。针对南极的特殊情况，我们下载了 APASS 和 PPMX 的南天星表，分别作为测光和位置定标的标准星表，APASS 有 g、r、i 多波段的测光结果，PPMX 的位置精度达到 0.04″，满足 AST3 的需要。
- 天球坐标系：根据 fits 文件中的望远镜指向信息和望远镜的 CCD 参数，预估一套天球坐标系，写入文件后，使用由巴黎天文台 Bertin 等人设计的 Astromatic 包中的 Source Extractor 软件进行测光，得到预估的星表。其后使用 Scamp 进行精确的天球坐标计算。
- 星等定标：使用 APASS 的 i 波段星表进行星等定标，程序基于 IDL。

在制作模板上，由于南极是由极昼逐渐过渡到极夜，开始天光背景没有到最暗的时候，模板不是很深，而为了尽快进行图像相减寻找变源，设计了模板动态自动更新。开始观测的图像达到一定质量即作为模板，有新的图像后，如果极限星等更深则作为新的模板，而且质量好的图像都保存着，累计达到一定数目后进行图像叠加得到更深的模板。

- 图像相减：根据前面做好的天球坐标系，使用 wcsremap 将图像对齐，得到天球坐标一致的两张图。使用 HOTPANTS 对目标图像和模板图像进行图像相减的操作，以期获得较好的相减结果，得到暂现源候选体的图像信息。然后把候选体传回国内并显示在网页上。

图像相减后得到的变源很多是假源，AST3 团队针对 AST3 图像的特点设定了排除

标准，并对剩余的变源进行进一步排序，检查是否在星系附近，在模板上该位置是否没有星，据此设定优先级，优先级高的优先传回，并显示在网页的最顶端。我们为候选体建立了实时网页，并添加了该位置在其他星表的查询链接，包括 NED、DSS 图像、小行星数据库等，以便进行进一步的识别和判断（见图 15）。

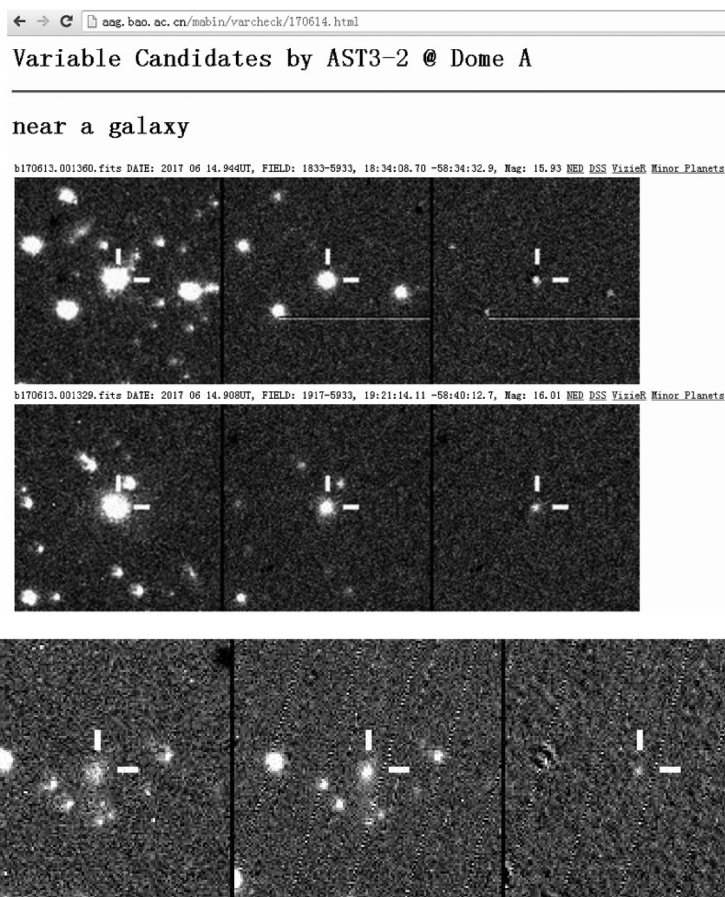


图 15 上图：AST3 变源候选体网页；下图：AST3-2 于 2017 年发现的超新星 SN 2017fbq(ATS-17A)

### 2.5.2 实现 AST3 巡天的实时监测

高精度测光需要图像曝光期间设备所处环境和状态的信息的辅助。在实现自动巡天后，我们开展了对南极现场进行实时监测的工作。为此，AST3 团队独立研发了第二代昆仑自动气象站 KLAWS-2G 和昆仑云量极光监测仪 KLCAM（见图 16）。KLAWS-2G 是个多层气象站，每一层都布有温度传感器和风速风向仪。每 10 秒采集一次数据，每 15 分钟将数据回传至服务器。KLAWS-2G 于 2015 年 1 月在昆仑站成功安装，连续运行至 2016 年 9 月。KLAWS-2G 在 2017 年经过科考队员简单维护后，至今仍在工作。KLCAM 使用配有鱼镜头的商业相机对昆仑站全天云量和极光进行监测，每半小时拍摄一幅照片。受限于通信费用，每天回传当地午夜和正午两幅照片。KLCAM 于 2017 年在昆仑站成功安装，至今工作正常（见图 17）。



图 16 现场 KLAWS-2G (左) 和 KLCAM 拍摄的极夜期间的监测照片 (右)

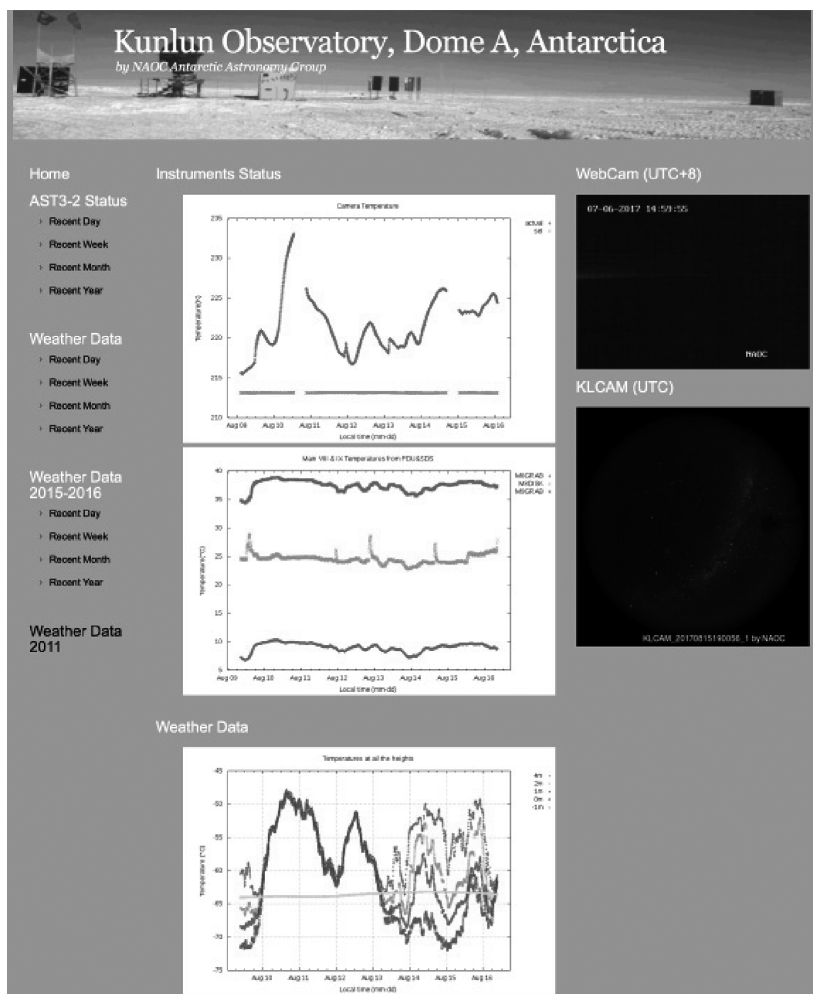


图 17 实时仪器状态和现场监测网页截图



为了方便研究人员实时了解当前和回溯以前的仪器和气象信息，AST3 团队开发了仪器状态和气象数据实时显示网站，不仅显示现场的监测，也对 AST3 运行的所有仪器设备进行监测。用户访问 <http://aag.bao.ac.cn/klaws>，可以查看到最新的数据，也可以在指定时间范围，查看感兴趣的时间段内的数据。运行证明，实时监测网站为仪器设备和现场环境及天气等提供的实时信息，不仅有助于评估数据质量、提高测光精度，也极大地保障了 AST3 望远镜的安全运行，如风速过大时停止观测以保护望远镜。

### 2.5.3 AST3-1 2012 年数据的离线高精度测光

AST3-1 南极 2012 年数据在 2013 年由科考队员带回国内，之后 AST3 团队对其开展了高精度测光工作，将极限星等提高 1 等左右，亮星测光精度  $2 \sim 3$  mmag。

天文图像在测量分析前先要进行各种仪器效应的改正，如 AST3 的图像改正包括了 CCD 读出时的 cross talk 效应、overscan bias、暗流、平场，AST3 团队着重研究了大视场平场改正与暗流改正。

常用的平场改正包括圆顶（dome）平场、晨昏蒙影（twilight）平场和超级夜天光（super-sky）平场。由于昆仑站无人值守，无法使用圆顶平场；刚开始观测时图像数目较少，无法获取 super-sky，而且 2012 年 AST3-1 的观测主要为密集星场，也很难得到 super-sky。因此 twilight 平场就成为唯一选择。但是，由于 twilight 并不是完全均匀（亮度梯度  $1\% \sim 10\%$  每度，与太阳方位角和望远镜的夹角有关），对于 AST3  $3 \times 1.5$  平方度的视场，其不均匀性无法忽略。我们先将大量 twilight 图像叠加出一幅初始平场图像，再将每幅 twilight 图像与其相除，先扣除渐晕、不同读出通道增益差别等的影响，再对天光梯度分读出通道进行拟合（见图 18），改正后再将 twilight 叠加得到最终的平场图像。由图 19 可以看出，未改正前 twilight 图像 RMS 中心小（0.2%），四周大（0.3% ~ 0.5%）；改正天光梯度后，twilight 图像的 RMS 显著下降，且全视场内更加均匀（0.1% 左右）。

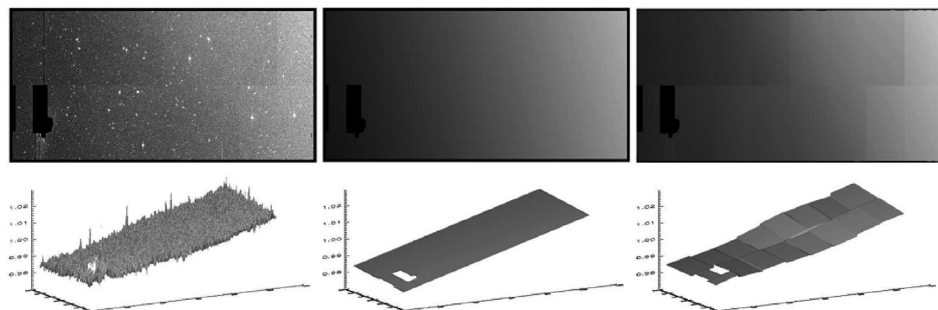


图 18 左图：一幅 twilight 图像除以初始平场；中图：将残余天光梯度在全视场拟合；右图：将残余天光梯度分 16 个读出通道拟合（上面为二维图像，黑色区域为坏像素；下面为三维图像）

针对 CCD 温度较高、暗流较大的问题，AST3 团队着重研究了特殊的暗流改正。由于 CCD 采用帧转移模式，现场无法获取暗流图像，而相比之前在国内获取的实验室暗流，暗流细节又发生了变化。我们发展了一种从一对观测图像中计算暗流的方法<sup>[15,16,18]</sup>，有效地改正了暗流（见图 20），将较高温度图像的背景噪声也降至接近光子噪声（见图 21），从而提高了测光深度和精度，对 CCD 温度在  $-40^{\circ}\text{C}$  左右的图像，极限星等提高了 1 个星等。



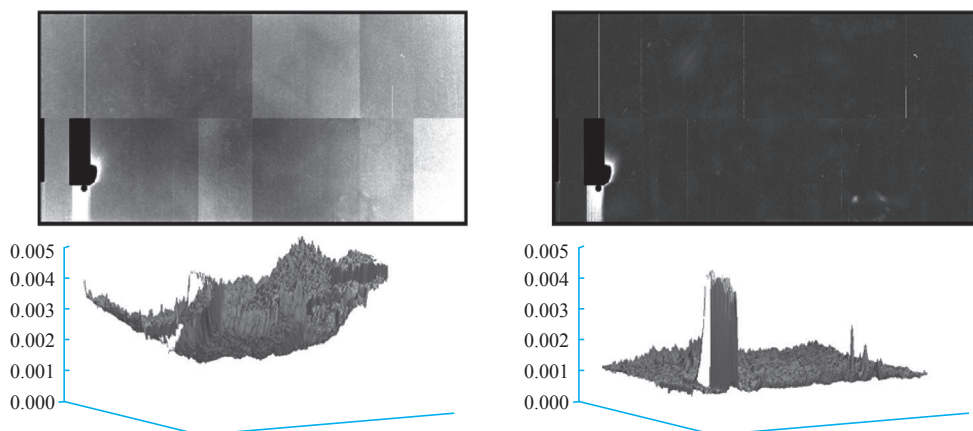


图 19 twilight 图像直接叠加（左图）和扣除天光梯度后再叠加（右图）的 RMS 比较（上图为二维图，下图为三维图）

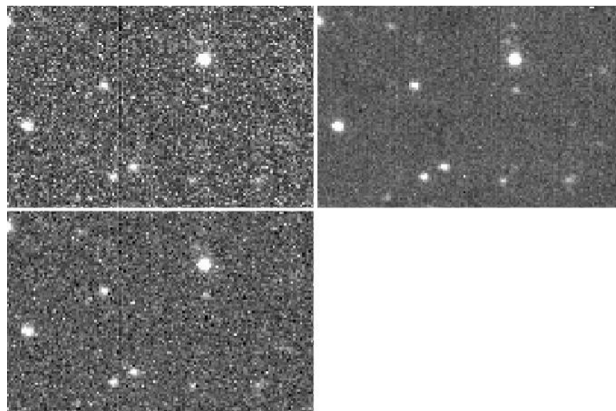


图 20 左上：AST3-1 原始图像；左下：利用实验室暗流改正后；右上：利用观测图像计算出的暗流改正后，背景噪声大大降低，暗源更明显

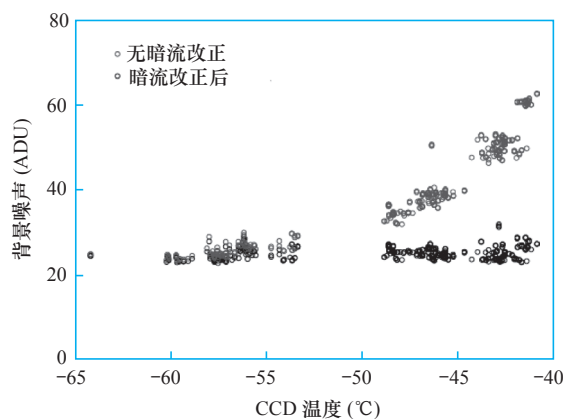


图 21 对背景值接近的一些图像，未改正前背景噪声随 CCD 温度升高而迅速增大；用从观测图像计算出的暗流进行改正后，将背景噪声降至相同水平，接近光子噪声，显示了计算暗流非常有效

在对图像进行了 CCD cross-talk、overscan、暗流、平场等改正后，进行了孔径测光、位置定标、测光定标等，最终在 i 波段极限星等达到了 19 等，亮端测光精度  $2 \sim 3$  毫星等，位置测量绝对精度约  $0.1''$ ，而亮星的相对精度可达  $0.04''$ ，显示了 AST3 在时域天文学方面的巨大潜力。AST3-1 2012 年的数据已通过中国虚拟天文台发布 (<http://explore.china-vo.org/>)，包括改正后图像（超过 14 000 幅）及对应星表、光变曲线等。

AST3 团队与其他 AST3 团队一起，利用这些数据进行了变源的搜寻与研究。在 transit 一个天区几天的观测中，就找到了 560 颗变星，其中 339 颗是新发现的。这里面有 85 颗食双星 (EW、EB 和 EA)，27 颗脉动变星 ( $\delta$  Scuti,  $\gamma$  Doradus,  $\delta$  Cephei variable 和 RR Lyrae stars)。对光变曲线细致分析后，发现 34 颗食双星表现出 O'Connell 效应，还有一个复合双星系统有 RS CVn-like 的光变曲线，该源已经申请到了 Gemini South 的光谱后随观测时间（见图 22）。

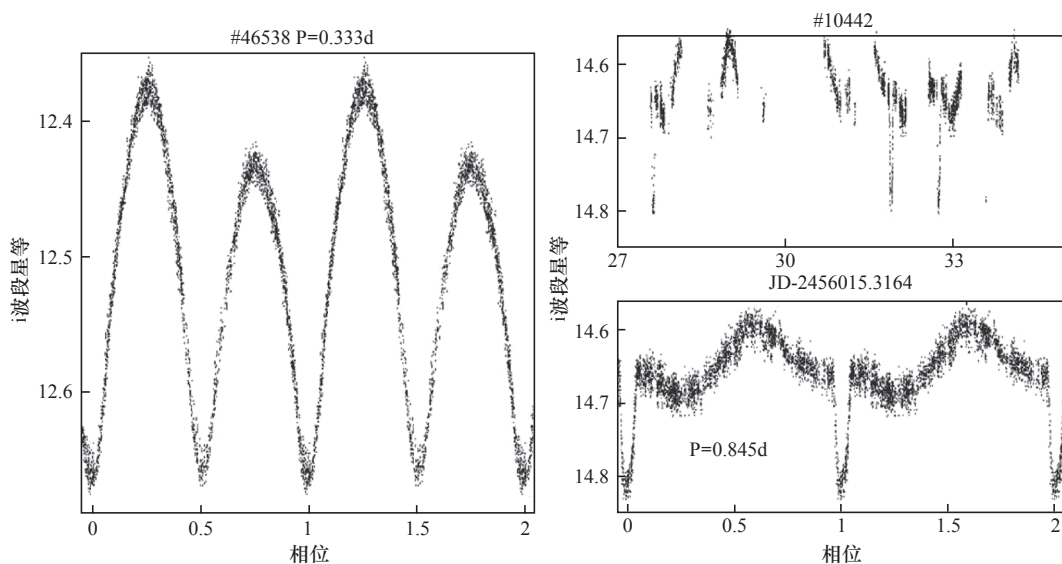


图 22 AST3-1 2012 年数据光变曲线例子。左图：样本中 O'Connell 效应最强的变星的相位图；右图：有 RS CVn-like 的光变曲线的变星，上图为光变曲线，下图为相位图

#### 2.5.4 合作开发 AST3 运行及数据处理辅助软件系统

由于受卫星传输带宽和传输价格的限制，AST3 观测图像无法整幅传回，只能在现场实时处理观测图像。因此，AST3 团队和天津大学计算机科学学院合作，开发了 AST3 国内高性能数据处理软件与数据库系统和 AST3 南极在站数据处理与守护软件系统，设计了基本的实时数据处理流程。其中，AST3 团队负责天文数据处理软件的研发工作，除了基本的 CCD 图像预处理，还包括孔径测光等；天津大学计算机科学学院负责后台守护进程、通用的数据处理和数据库的研发工作。在站数据处理守护进程逻辑如图 23 所示。为了提高在站数据处理系统的稳定性和可靠性，守护进程的设计采用了多级保护模式，如图 24 所示。数据处理流程如图 25 所示。这些综合的设计和实现，保证了 AST3 实时数据处理的可靠性。

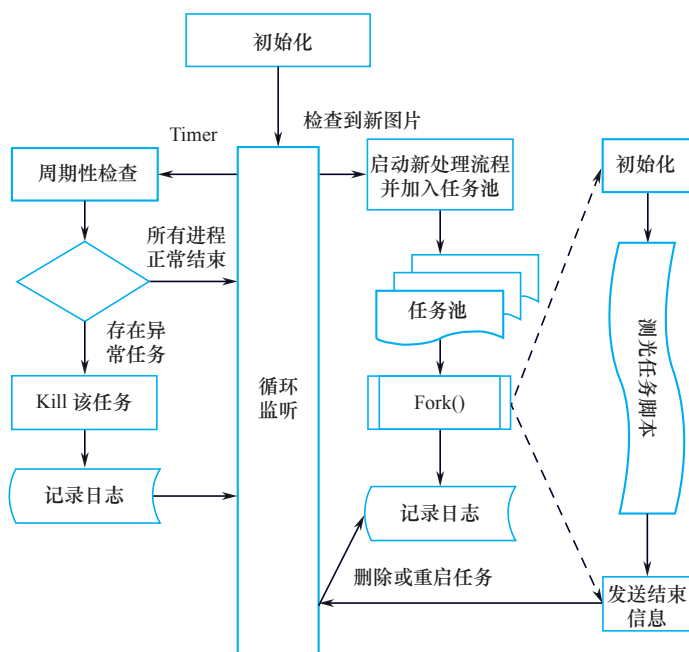


图 23 在站数据处理守护进程逻辑

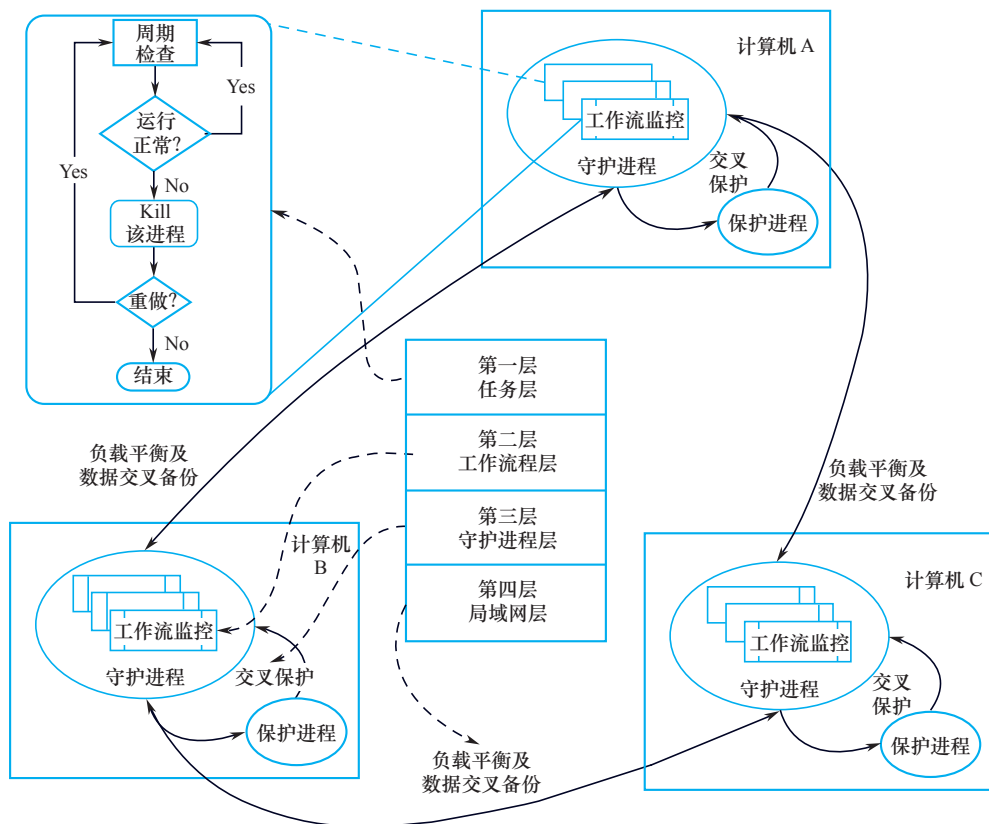


图 24 在站数据处理守护进程多级多节点保护

AST3 团队与天津大学合作研发了 AST3 海量数据库系统，用于存放 AST3 星表数据（见图 26）。通过使用非关系型的 MongoDB 数据库，插入 50 万条数据时，消耗时间仅为传统的 MySQL 数据库的 1/3。

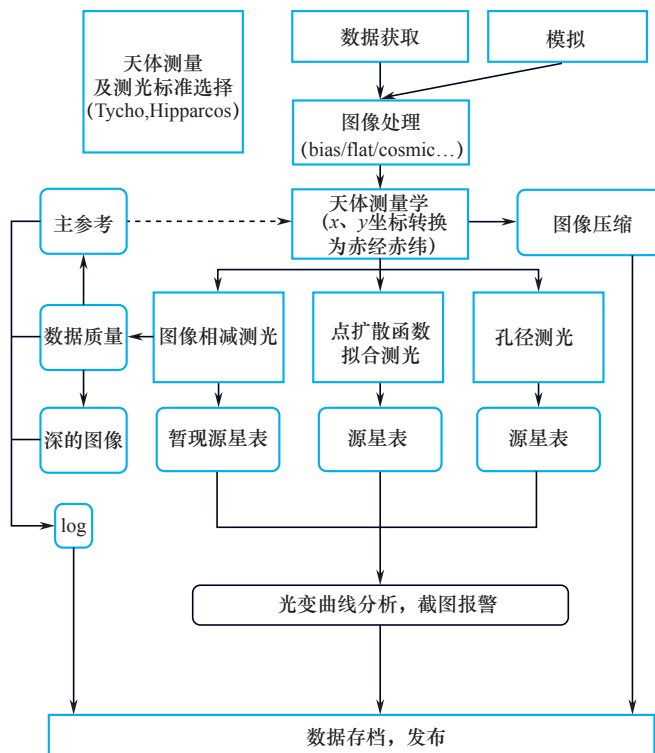


图 25 数据处理流程

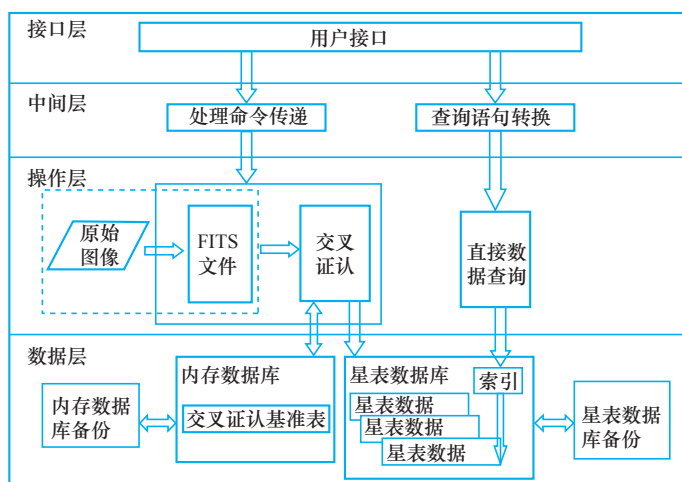


图 26 AST3 星表数据存储构架

### 3 围绕南极巡天望远镜 AST3 开展的科学研究

#### 3.1 南极 AST3 望远镜成功观测第一例来自引力波事件 GW170817 的光学对应体 AT2017gfo/SSS17a

2017 年 8 月 17 日, LIGO 和 VIRGO 共同探测到的引力波事件 GW170817<sup>[5]</sup>, 在引力波并合信号发生后的 1.7 秒, 美国宇航局的 Fermi 伽马射线卫星和欧洲的 INTEGRAL 卫星都探测到了一个极弱的短时标伽马暴<sup>[7]</sup>, 随后的观测确定了其宿主星系是距地球约 1.3 亿光年的 NGC4993。这是人类首次探测到来自双中子星并合的引力波事件, 也是人类首次将电磁波信号与引力波信号毫无疑义地联系在了一起。全球有超过 50 台天文设备对 GW170817 开展了精细观测, 南极巡天望远镜 AST3 合作团队也利用正在南极运行的 AST3-2 对 GW 170817 的光学对应体开展了密集观测<sup>[8]</sup>。

AST3 望远镜位于南极大陆的最高点冰穹 A, 其地理纬度为 -80 度 22 分。GW170817 虽然位于南天区, 由于指向为赤纬 -23 度 22 分 53.350 秒靠近地平的位置, AST3 取消了原有的软件限位, 在目标地平高度极低的情况下 (15 ~ 30 度) 采集了 8 天的有效数据 (8 月 18 日、20 日、21 日、23 日、24 日、25 日、27 日、28 日), 共 218 张图像数据。为了计算此次引力波事件在南极的最佳观测窗口, 需要对目标和日月的地平高度以及之间的角度关系进行实时的分析。由于这片天区并不是 AST3 的常规巡天天区, 并且南极的极夜已经过去, 这就使得准确、快速地计算出观测窗口时间, 从而及时调整观测策略显得格外重要。基于 python 的天文扩展包 astropy 所提供的实时日月的信息 (如地平高度、地球坐标), 我们制作了相应的网页用于快速地判断最佳观测时间, 并对观测的曝光时间等进行相应的调整。通过计算分析, 南极的观测窗口出现在了北京时间 8 月 18 日夜晚 21:00 左右 (见图 27), 得益于 AST3-2 稳定的主轴和机械结构设计, 在接下来约两个半小时的窗口期内, 望远镜成功地对这片天区进行了连续不间断的观测, 共采集了 21 张长曝光图像, 并且利用这段时间的观测数据, 最终探测到了第一例来自双中子星合并的光学对应体信号。为了尽可能地记录下对应体亮度随时间的演化, 观测一直持续到了 8 月 28 日。

数据的分析和处理与观测同步进行。由于南极独特的地理位置, AST3-2 所拍摄的图像数据是通过铱星卫星进行传输的, 铱星传输速度较慢且通信费用昂贵, 存放在南极本地的海量图像数据需要及时地进行分析, 然后通过铱星将有效的数据传回。在本次的引力波光学对应体观测中, 我们使用南极本地计算机运行图像统计分析的相关程序, 从而计算出每张图像的天光背景值, 星象的半高全宽 (seeing 值) 以及极限星等统计数据, 挑选出观测质量较好的图像。使用 WCSTOOLS 的相关工具 (sky2xy, imcopy 等), 对已做好天体测量对的图像进行裁剪, 其中 sky2xy 可以快速地将目标的天球坐标转换为观测图像中的像素坐标, 而利用 imcopy 可截取出引力波事件发生天区的小范围图像。AST3-2 所使用的 CCD 大小为 10k×10k, 而裁剪后的图像大小仅为 1k×1k 左右, 文件大小缩小到原图像的 1% 左右, 因此大幅减少了数据通过铱星传输所需要的时间, 从而加快了后续数据处理的进度。最后得到的数据中, 18 日、23



日和 24 日的观测数据质量最优，5 分钟的曝光在消光接近 3 星等时，极限星等仍达到了 18.5 等，这也提供了足够的深度使 AST3 有机会对该引力波较早期的光学信号进行跟踪探测。

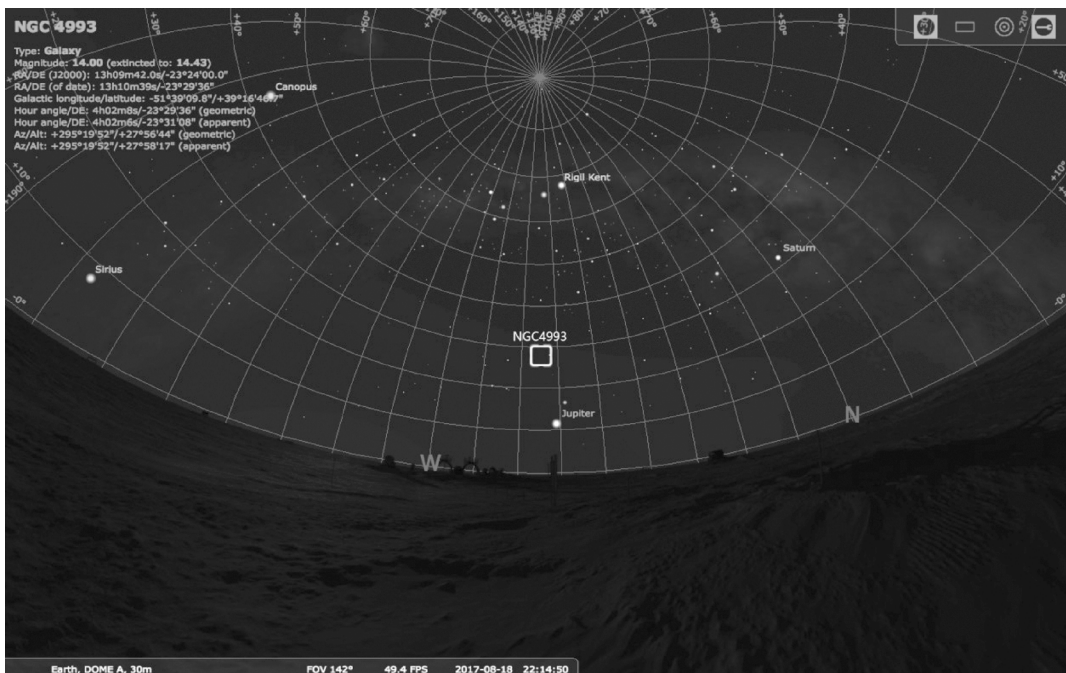


图 27 AST3-2 在 8 月 18 日观测窗口期内目标地平高度 (<30 度) 的示意图

由于此次事件发生在星系 NGC 4993 外围，单次拍摄的图像中很难与来自这个较亮星系本身的信号区分开来，因此我们采用了图像相减的方式。而在图像相减之前，需要对天文图像进行对齐，这就要求基于图像本身的 wcs 信息，对图像进行重新采样 (Resampling)。其中通用的差值方式为 Lanczos-3，这样的算法会对图像中每一个像素都单独进行计算。即便对裁剪后的图像，依然需要进行百万次量级的运算。除此之外，由于不同时间拍摄的同一天区的图像有着不同的 seeing 和点扩散函数 (Point Spread Function)，图像相减本身需要使用空间相关的 kernel 函数对图像做卷积，这个过程也存在大量的计算和傅里叶变化。为提高计算效率，我们使用了 Cython 和多线程 OpenMP 并行对原有的程序进行了加速，其中 Cython 可以让我们使用近似于 Python 的简单语法，对数据类型进行约束后，即可获得接近于 C 程序的运算速度，而 OpenMP 并行则可以同时调用计算机的多个 CPU 核心进行运算。这样整体的速度提高了约 10 倍，这使得图像处理的效率得到了很大的提升。调试好的程序成功地抠出了来自宿主星系的信号，AST3 探测到的引力波光学对应体也终于浮出了水面 (见图 28)，而信号所在的天球坐标与 LIGO 合作组给出的双中子星并合的位置完全吻合，其偏差小于一个角秒，自此我们就确认了 AST3 已经成功探测到了来自 GW170817 引力波事件的光学对应体。

通过随后的测光和千新星 (kilonova) 模型拟合 (见图 29)<sup>[8]</sup>，我们发现这次双中子星并合产生约 1% 太阳质量并以大约光速的 30% 快速运动的抛射物，也可以说是抛

出超过 3 000 个地球质量的富含中子的物质，这些物质通过快中子俘获过程，核合成重元素，部分形成比铁还重的超重元素。AST3 的观测数据与国际其他望远镜探测得到的数据，都对我们认识双中子星并合的物理过程提供了非常重要的信息。

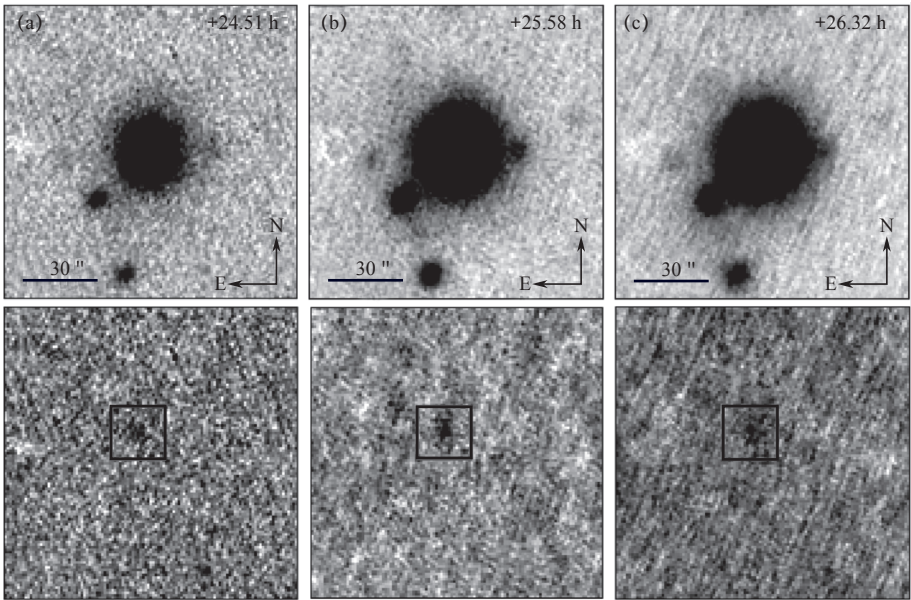


图 28 AST3-2 在 8 月 18 日观测窗口期内引力波光学信号（方框内）

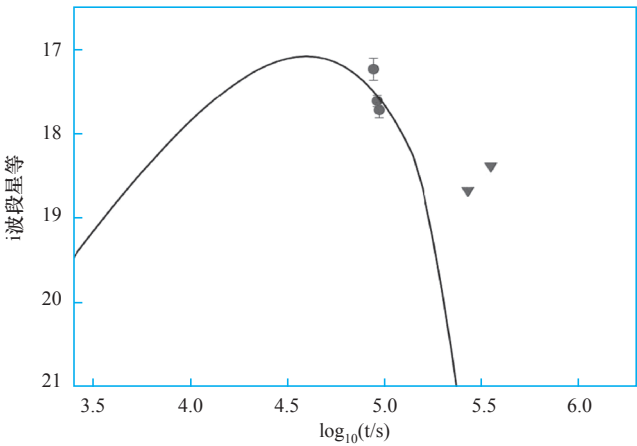


图 29 AST3-2 测光数据显示的 GW170817 光学对应体时间演化和千新星（kilonova）半解析模型拟合结果

3.2 南极系外行星探测和星震学研究

南极极佳的天文观测条件、极夜长达 100 多天的连续黑夜，也为系外行星和星震学研究提供了其他地面观测站无法比拟的条件。AST3 合作团队利用 AST3 望远镜开展了一系列相关的科学研究。搜寻太阳系外行星的凌星信号要求对恒星光变的测量精度达到

0.1%（可以探测到 1 个毫星等的变化）。而为了增加行星探测效率，又需要尽可能地使用大视场望远镜，同时观测数以万计的恒星，并自动搜寻出疑似的凌星信号。这样的自动化大视场高精度观测几乎是目前地面测光观测水平的极限。

为了达到科学目标的要求，一个成熟可靠的自动化软件是必不可少的。在项目执行期间，我们自主开发并完善了一套软件系统，可以自动完成海量恒星测光图片处理、高精度光变曲线生成、行星凌星信号探测。在亮星端其测光精度可优于 1 个毫星等（见图 30），并且该软件对超级地球到海王星大小行星的探测效率超过 30%，热木星的探测效率超过 90%。其测光精度在国际上同类型项目中处于领先地位（见表 1）。该软件的成功开发保障了课题研究内容的顺利进行。

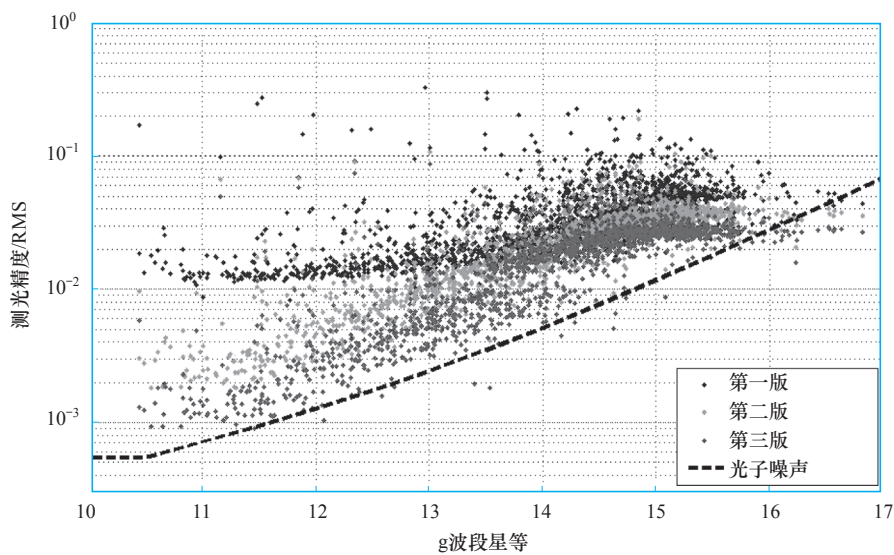


图 30 不断完善的自动化测光处理程序，目前已达到 1 毫星等测光精度，满足了太阳系外行星探测需求

表 1 AST3 测光精度与国际同类型项目的比较

项 目		最佳测光精度
Hungarian Automated Telescope Network (HATNetwork)	HAT-N	0.5%
	HAT-S	0.1%
Wide Angle Search for Planets (WASP)	WASP-S	0.5%
	Super-WASP-N	0.5%
XO		1%
Kilodegree Extremely Little Telescope(KELT-North)		1%
Trans-atlantic Exoplanet Survey (TrES)		0.2%
AST3		0.1%

AST3 合作团队利用自主开发的软件，对 CSTAR、AST3 以及 Kepler 数据进行了处



理分析,2014年首次在南极成批量地发现系外行星候选体,首批发现的6颗系外行星候选体,掩食深度在0.7%~2.1%之间,周期在1.4~10天。这是国际上在南极天区得到的第一批系外行星候选体。

在2016年南极极夜期间,AST3-2望远镜对TESS卫星计划全年覆盖的重点天区进行了长达一个月的连续观测。这是AST3-2望远镜首次利用自己研发的自动控制系统在极夜期间长时间自动化观测,表明本项目硬件软件系统已经达到了预期水平。TESS是下一代美国系外行星勘测卫星,它将在2017—2018年发射,对全天亮星进行观测,搜寻太阳系外行星。由于视场限制,TESS对绝大多数天区的持续观测时间只有1个月,这表示它将主要覆盖短周期行星。但在南北黄极附近的区域,将会被TESS连续观测超过12个月时间,因此这部分天区内的任何行星、变星目标,都将成为研究热点,受到全世界的关注。由于AST3-2位于南极冰穹A,有着得天独厚的纬度优势,可以非常好地覆盖TESS南黄极附近天区。AST3合作团队在该目标区域内选择了10个视场进行观测(见图31),总计获得了约32000张图片,共发现了50余个太阳系外行星候选体。其中最小的凌星深度只有0.5%(见图32),并且在AST3观测的结果中十分显著,这充分表明了AST3的探测能力十分优秀。这是继南极第一批6颗系外行星候选体后,我国首次利用自己的望远镜在南极发现大批量的系外行星候选体,标志着AST3的软硬件水平已经成熟,达到了预期目标。在后续的观测中可以批量“产出”太阳系外行星候选体。这一次的系外行星发现也表明我国在国际系外行星探测领域开始具备一定的竞争力,逐步赶上国际先进水平。正因为有这样的竞争力,AST3合作组中的南京大学团队在申请澳大利亚AAT望远镜时,在2017年上、下半年都顺利获得了一个星期的观测时间,而著名的HAT-South项目也愿意与AST3共享AAT的观测时间,这都表明了AST3合作组在系外行星探测领域逐渐获得了国际认可,具备了以前没有的影响力。另外,南极候选系外行星的成果也得到了新华社的现场采访报道。

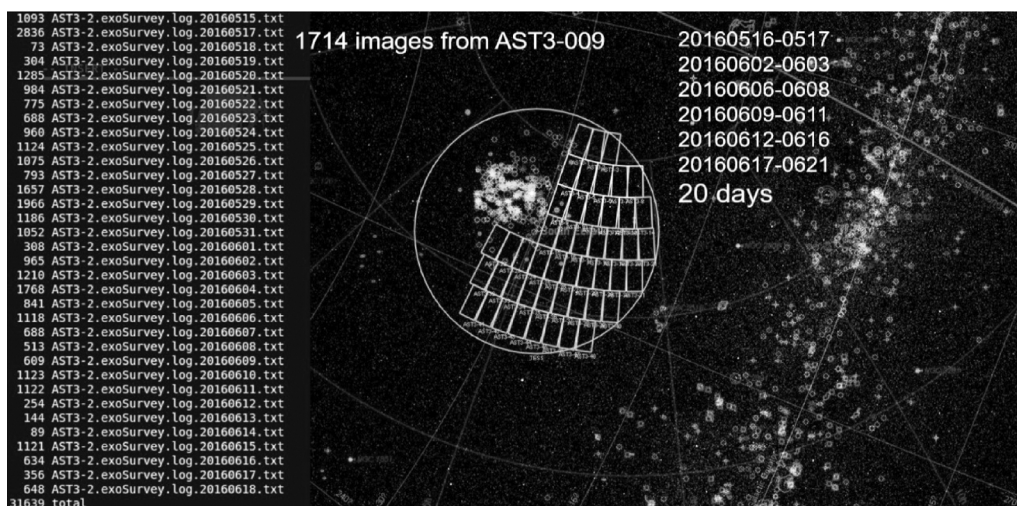


图31 2016年AST3-2望远镜对TESS南黄极附近天区进行了20余天的巡天观测

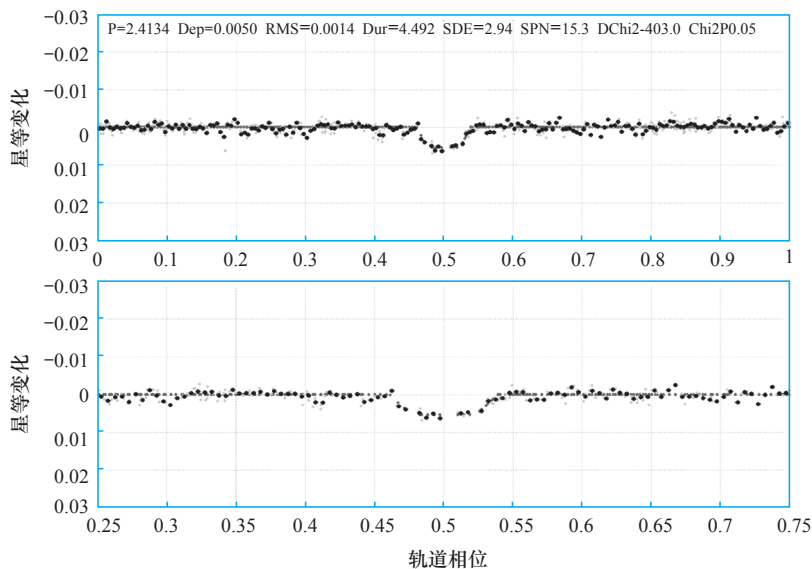


图 32 AST3 望远镜找到的一颗系外行星候选体，其凌星信号只有 0.005 星等，但在 AST3 的测光精度下显得非常显著，这显示 AST3 项目已经具备足够的能力搜寻小质量太阳系外行星

AST3 合作团队还利用南极数据开展了星震学研究。南极冰穹 A 的观测可为星震学研究提供长时间、不间断、海量的高精度多色测光数据，而多色数据是空间望远镜所不能得到的，可对脉动变星进行模式证认，对星震学研究具有特殊意义。

### 3.3 宇宙学研究

AST3 团队利用南极天文观测特性所能提供的高精度大范围的天文观测数据，结合国际上其他天文数据，通过高精度数值模拟技术，使用半解析方法与解析方法研究涉及星系团及宇宙大尺度结构的一些重要基本问题，发展利用南极天文观测数据进行宇宙学研究的方法体系，实现观测、理论和数值模拟三者的紧密结合。结合南极观测数据从宏观上精密解析宇宙中结构形成。研究宇宙中的弱、强引力透镜系统，并以此推算宇宙学参数。围绕暗能量的物理本质、宇宙大尺度结构等前沿关键问题给出物理解释。

## 4 结论和展望

中国的天文学家们计划利用冰穹 A 昆仑站独特的自然环境建成口径为 2.5 米的昆仑暗宇宙光学红外巡天望远镜（KDUST）。KDUST 有别于通常意义上的通用望远镜。它具有明确的科学目标：宇宙学参数的观测测量及太阳系外行星的深入研究。其设计制造和观测模式都将基于这两个重大科学目标。它与国际上在研的下一代重大设备，如 LSST、WFIRST 及 EUCLID 具有一定的竞争和互补性。KDUST 要远比 AST3 强大得多，它兼具大视场光学红外巡天功能和极高的空间分辨本领，这些功能都是任何其他地面天文台址不可能达到的。KDUST 在光学波段有极高的空间分辨本领，将具有准太空望远镜的独特能力。其巡天速度比任何已有的地面望远镜都要快，并将在未来的天文学观测



领域占有重要地位。这一准空间独特能力使得 2.5 米光学近红外望远镜 KDUST 能够有效地研究宇宙中的暗物质和暗能量、星系及星系团的结构、银河系结构和动力学、恒星和恒星形成等基本天体物理问题。

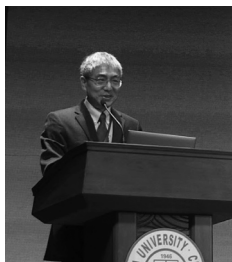
在 LIGO 和 VIRGO 引力波探测开创的多信使天文时代, KDUST 将和全球的先进探测设备、大型望远镜开展广泛的国际合作和联合观测, 构建一个强大的天文观测信息网络, 将目光伸向遥远的宇宙空间, 中国南极天文台的建设将在地面上为人类了解宇宙的基本规律开拓一个崭新的观测平台。

### 参 考 文 献

- [1] Cui, Xiangqun; Yuan, Xiangyan; Gong, Xuefei, Antarctic Schmidt Telescopes (AST3) for Dome A, Ground-based and Airborne Telescopes II. Edited by Stepp, Larry M.; Gilmozzi, Roberto. Proceedings of the SPIE, Volume 7012, article id. 70122D, 8 pp. (2008).
- [2] X. Yuan, X. Cui, X. Gong, D. Wang, and Z. Yao, Progress of Antarctic Schmidt Telescopes (AST3) for Dome A, Proc. SPIE, 7733,(2010),pp.77331V-77331V-7.
- [3] Li, Zhengyang; Yuan, Xiangyan; Cui, Xiangqun; Wang, Daxing; Gong, Xuefei; Du, Fujia; Zhang, Yi; Hu, Yi; Wen, Haikun; Li, Xiaoyan; Xu, Lingzhe; Shang, Zhaohui; Wang, Lifan, Status of the first Antarctic survey telescopes for Dome A, Proc. SPIE 8444, Ground-based and Airborne Telescopes IV, 84441O (September 17, 2012).
- [4] Yuan, Xiangyan; Cui, Xiangqun; Gu, Bozhong; Yang, Shihai; Du, Fujia; Li, Xiaoyan; Wang, Daxing; Li, Xinnan; Gong, Xuefei; Wen, Haikun; Li, Zhengyang; Lu, Haiping; Xu, Lingzhe; Zhang, Ru; Zhang, Yi; Wang, Lifan; Shang, Zhaohui; Hu, Yi; Ma, Bin; Liu, Qiang; Wei, Peng, The AST3 project: Antarctic Survey Telescopes for Dome A, Proceedings of the SPIE, Volume 9145, id. 91450F 8 pp. (2014).
- [5] The LIGO Scientific Collaboration; The Virgo Collaboration, GW170817: Observation of Gravitational Waves from a Binary Neutron Star Inspiral, eprint arXiv:1710.05832.
- [6] The LIGO Scientific Collaboration; GW150914: First results from the search for binary black hole coalescence with Advanced LIGO, Physical Review D, Volume 93, Issue 12, id.122003.
- [7] LIGO Scientific Collaboration; Virgo Collaboration; GBM, Fermi et al, Multi-messenger Observations of a Binary Neutron Star Merger, eprint arXiv:1710.05833.
- [8] Hu, Lei; Wu, Xuefeng; Andreoni, I. et al, Optical Observations of LIGO Source GW 170817 by the Antarctic Survey Telescopes at Dome A, Antarctica, eprint arXiv:1710.05462.
- [9] Kilpatrick, Charles D.; Foley, Ryan J.; Kasen, Daniel et al, Electromagnetic Evidence that SSS17a is the Result of a Binary Neutron Star Merger, eprint arXiv:1710.05434.
- [10] Michael G. Burton, Astronomy in Antarctica, The Astronomy and Astrophysics Review, Volume 18, Issue 4, pp.417-469.
- [11] Zou H, Zhou X, Jiang Z et al. The sky brightness and transparency in i-band at Dome A, Antarctica, Astronomical Journal, 140(2):2146-2146, 2010.
- [12] Yuan, X. and Su, D-q, Optical system of the Three Antarctic Survey Telescopes, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 424, (2012), 23-30.
- [13] Li, Xiaoyan; Wang, Daxing; Xu, Lingzhe; Zhao, Jianlin; Du, Fujia; Zhang, Yue, Control system for

- the first three Antarctic Survey Telescopes (AST3-1), Ground-based and Airborne Telescopes IV. Proceedings of the SPIE, Volume 8444, article id. 84445M, 8 pp. (2012).
- [14] Yuan, Xiangyan; Cui, Xiangqun; Su, Ding-qiang; Zhu, Yongtian; Wang, Lifan; Gu, Bozhong; Gong, Xuefei; Li, Xinnan, Preliminary design of the Kunlun Dark Universe Survey Telescope (KDUST), Astrophysics from Antarctica, Proceedings of the International Astronomical Union, IAU Symposium, Volume 288, pp. 271-274.
- [15] Ma, Bin; Shang, Zhaohui; Hu, Yi; Liu, Qiang; Wang, Lifan; Wei, Peng, A new method of CCD dark current correction via extracting the dark Information from scientific images, Proceedings of the SPIE, Volume 9154, id. 91541T 8 pp. (2014).
- [16] Ma, Bin; Shang, Zhaohui; Wang, Lifan; Hu, Yi; Liu, Qiang; Wei, Peng, The nonlinear photon transfer curve of CCDs and its effects on photometry, Proceedings of the SPIE, Volume 9154, id. 91541U 10 pp. (2014).
- [17] Shang, Zhaohui; Hu, Kelian; Hu, Yi; Li, Jiliang; Li, Jin; Liu, Qiang; Ma, Bin; Quinn, Jason L.; Sun, Jizhou; Wang, Lifan; Xiao, Jian; Yu, Jia; Yu, Ce; Yang, Mujin; Yuan, Xiangyan; Zeng, Zhen, Operation, control, and data system for Antarctic Survey Telescope (AST3), Observatory Operations: Strategies, Processes, and Systems IV. Proceedings of the SPIE, Volume 8448, article id. 844826, 7 pp. (2012).
- [18] Ma, Bin; Shang, Zhaohui; Wang, Lifan; Boggs, Kasey; Hu, Yi; Liu, Qiang; Song, Qian; Xue, Suijian, The test of the  $10k \times 10k$  CCD for Antarctic Survey Telescopes (AST3), Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy IV. Proceedings of the SPIE, Volume 8446, article id. 84466R, 7 pp. (2012).
- [19] Zhu, Yongtian; Wang, Lifan; Yuan, Xiangyan; Gu, Bozhong; Li, Xinnan; Yang, Shihai; Gong, Xuefei; Du, Fujia; Qi, Yongjun; Xu, Lingzhe, Kunlun Dark Universe Survey Telescope, Proceedings of the SPIE, Volume 9145, id. 91450E 17 pp. (2014).
- [20] Wang, Lingzhi; Ma, Bin; Li, Gang; Hu, Yi; Fu, Jianning; Wang, Lifan; Ashley, Michael C. B.; Cui, Xiangqun; Du, Fujia; Gong, Xuefei; Li, Xiaoyan; Li, Zhengyang; Liu, Qiang; Pennypacker, Carl R.; Shang, Zhaohui; Yuan, Xiangyan; York, Donald G.; Zhou, Jilin, Variable Stars Observed in the Galactic Disk by AST3-1 from Dome A, Antarctica, The Astronomical Journal, Volume 153, Issue 3, article id. 104, 24 pp. (2017).

### 作者简介



王力帆，中国南极天文中心主任，中国科学院紫金山天文台研究员、博士生导师，国家“千人计划”创新人才，极高红移瞬变源研究计划首席科学家，已发表文章 200 余篇。主要从事超新星及宇宙学研究，是南极巡天望远镜（AST3）合作、“十二五”南极天文台的首席科学家。长期主持国际合作研究项目“超新星三维结构的偏振研究”，是国际超新星偏振观测的领导者。近年来研究方向集中在利用南极昆仑站的优良台址，研制光学红外望远镜，用以探索宇宙暗能量的性质以及宇宙再电离时代的瞬变源的探测。

# 我国首次获得“戈登·贝尔”奖的超级计算重大应用 ——千万核可扩展大气动力学全隐式模拟

杨超<sup>1</sup> 薛巍<sup>2,3</sup> 付昊桓<sup>2,3</sup> 尤洪涛<sup>4</sup> 王兰宁<sup>5</sup>

(1. 中国科学院软件研究所; 2. 清华大学; 3. 国家超级计算无锡中心; 4. 国家并行计算  
机工程技术研究中心; 5. 北京师范大学)

## 摘要

美国计算机学会“戈登·贝尔”奖(ACM Gordon Bell Prize)设立于1987年,由高性能计算先驱——戈登·贝尔(Gordon Bell)先生发起,每年颁发一次,表彰世界范围内高性能计算的杰出成就,特别强调奖励高性能计算应用于科学、工程和大型数据分析领域的创新。本文分析了近十余年来围绕隐式求解器获得“戈登·贝尔”奖的研究成果,并介绍了我们获得2016年度“戈登·贝尔”奖的工作。

## 关键词

高性能计算;“戈登·贝尔”奖;隐式求解器

## Abstract

The ACM Gordon Bell Prize, established in 1987 by Gordon Bell, a pioneer of high-performance computing, is awarded each year to recognize outstanding achievement in applying high-performance computing to applications in science, engineering, and large-scale data analytics. In this short article, we will give a short review of this prestigious award and summarize some award-winning works on designing highly efficient implicit solvers over the past decades. After that, we will introduce our recent work that won the ACM Gordon Bell Prize in 2016, in which a ten-million-core scalable fully implicit solver for nonhydrostatic atmospheric dynamics was presented.

## Keywords

High-Performance Computing; ACM Gordon Bell Prize; Implicit Solver

## 1 “戈登·贝尔”奖与隐式求解器

“戈登·贝尔”奖(Gordon Bell Prize)设立于1987年,是高性能计算应用领域最有影响力的国际奖项,由世界最大的计算机学术组织——美国计算机学会(Association for Computing Machinery, ACM)每年颁发一次,旨在奖励高性能计算在科学、工程和数据分析领域的前沿创新。近三十届“戈登·贝尔”奖的评定和颁发,见证了超级计算机和依托于超级计算机的高性能计算应用的飞速发展。从头几年的GFlops,到现在10 PFlops量级的应用性能,无论是超级计算机硬件所能提供的计算能力,还是高性能计算的算法设计与软件技术,都取得了长足的进步。

从超级计算机的发展角度而言, 占据 TOP500 鳌头的系统有机会带来“戈登·贝尔”奖的连续效应, 但性能并不是获奖的唯一标准。评委们会综合考虑应用的实际价值、难度, 以及各项工作中所提出方法的创新性和通用性。对实际应用来说, 单纯的性能不能说明所有的问题, 对技术的促进才是终极的目标。这一点在 2012 年的“戈登·贝尔”奖评选中得到了充分的体现。当时入围的工作有两项都是天体模拟的应用: 一个在“红杉”(Sequoia) 上进行, 取得了 13.94P 的性能和 69.2% 的效率; 另一个在“京”(K Computer) 上进行, 取得了 5.67P 的性能和 50.2% 的效率。尽管前者的应用性能和效率都更好, 但最终“京”上的工作却因为取得了对应用问题更快的模拟速度而获奖。

从不同国家的参与程度而言, 美国和日本是“戈登·贝尔”奖最有力的角逐者。欧洲的超算中心(如德国的尤里西超算中心)有少量的入围工作。与上述国家相比, 我国的高性能计算应用水平相对滞后, 除了 2013 年由我国国防科学技术大学参与的地震波模拟应用曾经入围之外, 在 2016 年之前尚没有任何入围和获奖的记录。我国的超级计算机已经先后多次问鼎 TOP500 世界榜首, 在此基础上, 如何尽快提升我国高性能计算的应用水平, 以充分发挥现有硬件平台的计算能力, 已经成为一个亟待解决的问题。

在以大气动力学模拟为代表的大型科学与工程计算应用中, 偏微分方程的数值求解十分关键, 高效的求解器往往扮演着“发动机”的角色。众多求解器算法大致可以分为两类: 显式求解器和隐式求解器。其中, 显式求解器相对简单, 容易并行, 但稳定性差, 时间步长依赖于空间分辨率, 在大规模并行环境下的实际问题的求解能力呈现下降趋势。相对而言, 隐式求解方法因具有稳定性高、鲁棒性好的重要优势, 成为普遍看好的技术, 但由于需要求解大型线性或非线性系统, 其高度的复杂性制约了其发展和普及。

隐式求解器的创新和应用是“戈登·贝尔”奖的一个重要风向标。对 1999 年至 2015 年“戈登·贝尔”奖的获奖成果进行分析, 可以大致对其划分为三个阶段。

- 第一阶段(1999—2004 年): 基于区域分解、多重网格或者谱方法等的隐式求解器在空气动力学、大气模拟、固体力学等应用中纷纷取得数千核的可扩展性, 可求解数百万至数亿未知数的问题, 连续多次获得“戈登·贝尔”奖的青睐; 在这一阶段, 隐式求解器的应用水平在“ASCI 红”“地球模拟器”“ASCI 白”等多核集群系统或者大型向量机上被推进到极致, 造就了隐式求解器的一段黄金时代。
- 第二阶段(2005—2010 年): 由于上一个阶段隐式求解器取得的巨大成功, 在本阶段, “戈登·贝尔”奖的关注重点不再是偏微分方程的数值求解问题, 而是集中在分子动力学、第一性原理、N 体计算等问题的高效求解方法和应用创新研究。
- 第三阶段(2011—2014 年): 隐式求解器遇到了来自硬件体系结构的全新挑战, 传统的并行隐式求解器既无法应用在配备了 GPU、Intel Xeon Phi 等众核处理器的集群系统, 也难以适应具有超过百万 CPU 核的超大型集群环境; 因此, 在 2011 年和 2013 年获得“戈登·贝尔”奖的两项工作中, 分别使用了稳定性条件苛刻但易于并行的显式求解器, 在基于 CPU-GPU 架构的 Tsubame2.0 系统以及具有 157 万 CPU 核的 IBM “红杉”系统上进行了极端尺度的材料科学相场模拟和云状空化模拟。

直到 2015 年，百万核并行环境下隐式求解器的设计问题终于取得突破：来自美国 UT-Austin 等单位的研究团队提出一套复杂的嵌套多重网格方法，并在此基础上研制出世界首个具有百万核可扩展能力的全隐式求解器，该求解器部署于 IBM “红杉”系统，扩展至整机 157 万 CPU 核，在地幔模拟中取得巨大成功。然而，必须指出的是，以“天河二号”“神威·太湖之光”为代表的大型众核系统已经具有数百乃至上千万的计算核心，如何设计隐式求解器，从而充分发挥此类系统的强大计算能力，仍是一个亟待解决的挑战性难题。

## 2 2016 年度获奖工作

2016 年，由我国五家研究机构合作完成的“千万核可扩展大气动力学全隐式模拟”工作获得了该年度的“戈登·贝尔”奖<sup>[1]</sup>，实现了我国在这一奖项上零的突破。该项研究工作最早开始于 2007 年，最早的研究成果发表于 2010 年。在这十年间，研究团队分别在美国的“蓝色基因 L”，我国的“天河一号 A”“天河二号”等系统上完成数千核至上百万核可扩展模拟，面向大气模拟的浅水波问题和非静力欧拉问题，在显式、隐式求解器设计上有充分积累，开展了多项研究<sup>[2-6]</sup>。基于前期的研究积累，在 2016 年，研究团队凭借“神威·太湖之光”发布的东风，突破了异构众核极大规模并行环境下隐式求解器设计的难题，深入开展了显式、隐式求解器的比较性研究，应用于非静力大气动力学模拟，取得了具有高影响力的研究成果。

从技术上分析，隐式求解的主要开销在于大型离散线性系统求解。值得一提的是，不同于传统意义下的代数线性系统，此处待求解的系统具有明确的数学物理特性，即来自全可压缩欧拉方程的离散化，因此隐式求解器的设计应该充分利用原始问题的数学、物理和几何信息。在这里，我们采用迭代法（Iterative Method）与预条件子（Preconditioner）相互结合的策略进行求解，其中预条件子扮演了十分重要的核心角色。好的预条件子不但能够大幅度加速迭代收敛，而且开销不大，易于并行。可以说，整个隐式求解器的设计成败主要取决于预条件子的优劣。对此我们进行了深入的研究。

众所周知，国际主流的大型众核系统至少包含两个层次的并行度：一是进程级的并行度，往往可以达到数万至数十万量级；二是线程级的并行度，往往可以达到数十至数百量级。以“神威·太湖之光”为例，如果采用“核组”作为进程划分单位，进程级和线程级的并行度分别为 163 840 和 65，总并行度达到千万量级。对此，我们考虑采用“问题分离”（Separation of Concern）的思想，即如果可以针对进程级和线程级的并行度分别设计两套高效的预条件子，并且两者可以巧妙结合从而形成一个整体，则有希望设计出适应大型众核系统的预条件子。

在进程级方面，预条件子的设计可以借鉴传统 CPU 集群系统上的成功先例，最具代表性的工作就是 2015 年度的获奖工作<sup>[7]</sup>。该工作的主要创新是一套嵌套多重网格方法，包括了模型级、多项式级、几何级和代数级的多级嵌套结构，可以有效处理高度各向异性的非线性不可压斯托克斯问题，成功应用于地幔流动模拟，在 IBM “红杉”上扩展至整机 157 万 CPU 核。然而，该工作并不适合应用于大型众核平台，原因有两个：



一是该工作所采用的多重网格方法具有较多的层数，一般达到 15 ~ 20 层，从而粗网格问题规模很小，甚至需要采用直接法；二是该方法由于任务粒度的问题，很难做到较好的负载均衡，更难以在此基础上把线程级的并行进一步引入。

鉴于上述原因，我们考虑以区域分解方法（Domain Decomposition Method）为核心构造进程级求解器。区域分解思想最早于 1887 年由著名数学家 Schwarz 提出，用来证明 Dirichlet 初值问题解的存在性问题。20 世纪 80 年代末，Lions、Dryja 及 Widlund 先后使用该思想来构造并行迭代算法和预条件子，从而推动了区域分解算法的快速发展。区域分解方法有很多不同的类型，其中重叠型加法 Schwarz 预条件子算法由于其内在的天然并行性非常适合于分布式并行系统。特别地，限制型 Schwarz 进一步将通信开销缩减了一半，同时常能取得优于传统重叠型加法 Schwarz 算法的收敛性<sup>[8]</sup>，在实际应用中获得了广泛青睐。此外，还可以进一步在预条件子中补充粗网格矫正，从而进一步改善方法在大规模并行环境下的可扩展性和收敛性。

结合前期的研究经验，我们最终构造了一类瀑布型的多重区域分解算法作为进程级的预条件子，如图 1(a) 所示。该预条件子的层数依具体问题可以控制在 3 至 6 层，有效地降低了多重网格的复杂度。并且，在每一层均可以进行一致的区域分解剖分，在负载均衡和数据局部性上有很好的优势。多重网格的层间依赖采用“乘法型”方式处理，充分保证收敛效果，在层内的区域分解则按照“加法型”方式进行，从而最大限度地实现大规模并行。此外，瀑布型的多重网格可以进一步将每个计算层次的“磨光”操作次数减半，而限制型区域分解方式的引入则可以将进程间的通信开销减半。在每一层的区域分解，均需要对重叠型的子区域问题进行求解，如果子区域问题的求解器支持众核多线程并行，并有优秀的计算性能，则可以天然融入其中，从而完成整个隐式求解器的设计。

下面介绍如何设计一个高效的、支持众核多线程并行的子区域问题求解器。在单颗 GPU 等众核处理器上设计稀疏线性系统的求解器，国际上已经有大量的研究。然而，收敛性与并行性之间的矛盾问题一直没有得到好的解决。比如，完全可以在 GPU 上设计出具有优秀性能的 Jacobi 求解器，但是其收敛性与传统 CPU 上优秀求解器相比则相形见绌，从而其综合性能往往并不占据优势。

为了能够有效处理收敛性与并行性的平衡问题，我们考虑基于不完全 LU 分解（ILU）方法设计子区域求解器。国际上也已经有很多对 ILU 的并行算法研究工作，大部分都是基于分级调度的策略。该方法虽然充分保留了原始串行算法的收敛特性，但存在三个难以克服的劣势：一是并行度不高，一般仅有 10 左右或者更低，难以适应众核环境；二是层间同步多，每一层并行任务完成后均需要进行同步，而大量线程同步在众核平台上开销较大，会严重影响性能；三是数据局部性差，每个核的计算任务分配往往与具体问题相关，从而经常需要反复进行访存操作，制约了其在众核平台上的性能。2015 年，人们提出了一套新的解决方案——异步并行 ILU（PILU）方法<sup>[9]</sup>。然而，我们分析之后发现，该方法虽然能够实现高度并行，但破坏了原有的数据依赖关系，往往需要多次数据扫描，才能实现与串行同水平的收敛性。

为了解决上述问题，我们针对申威众核处理器，提出一套全新的基于几何信息的流

水线 ILU 算法 (GP-ILU)，如图 1 (b) 所示。该算法充分利用了原始问题的几何特性，而不仅仅是对矩阵索引的处理，最大限度地挖掘了问题的内在局部性和并行性。通过对于子区域进行合理切分，并将从核核组阵列与计算数据进行合理映射，大幅度改善了数据局部性。进一步通过挖掘潜在的数据并行逻辑，结合双缓冲等策略，并利用申威处理器的寄存器通信机制，可以有效实现类似三维“多米诺骨牌”的流水线并行，并显著提高访存效率。经过实测，GP-ILU 算法在神威平台单个众核核组上可以比原始串行算法快数 10 倍。

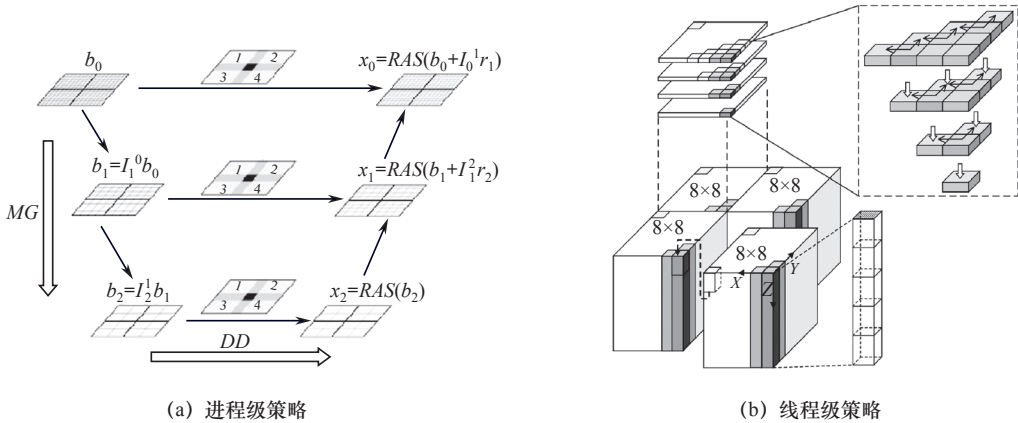


图 1 千万核可扩展隐式求解器的核心设计思想示意图

我们选择三维非静力大气动力学斜压不稳定性实验作为测试算例，进行了强、弱可扩展性测试，测试结果如图 2 所示。在强可扩展性测试中，我们分别使用 2 000 米和 3 000 米两种水平分辨率规模扩展至整机，并行效率分别达到 67% 和 45%，无论是扩展处理器核数，还是并行效率，相对于上一年度获奖成果均有大幅度提升。在弱可扩展性测试中，隐式求解器相对于显式求解器的实际模拟能力（用 SYPD 即“模式年每天”衡量）有大幅度提升，并且随处理器核数增多，分辨率增大，隐式求解器的优势越发

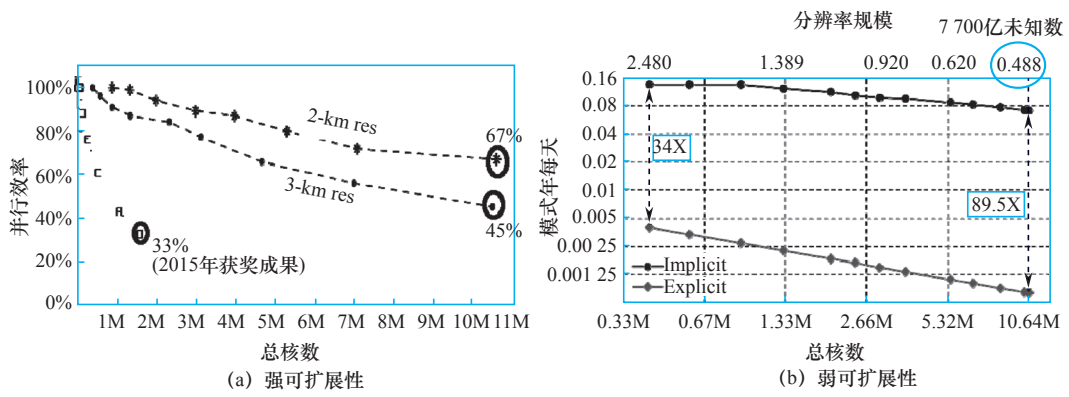


图 2 大规模并行测试结果

明显,在最高 488 米分辨率的情况下,对应的未知数个数达到 7 700 多亿,隐式求解器相对于显式求解器模拟能力提升 89.5 倍。值得一提的是,如果仅用持续浮点性能来衡量,显式求解器能够取得 26PFLOPS 的性能,隐式求解器则为 7.95PFLOPS。看上去,隐式求解器峰值性能更低,但其实际模拟速度则大幅度领先。

### 3 结语与展望

高性能计算是世界科技大国竞相角逐的战略制高点,而“戈登·贝尔”奖则视为世界高性能计算领域的一颗明珠。此次获奖,虽然是我国在“戈登·贝尔”奖历史中第一次获奖,但绝不是最后一次。在国家相关部门的持续、大力支持下,在我国并行计算前辈们的关怀和鼓励下,国内有更多优秀的高性能计算应用正在不断涌现,我国高性能计算应用水平正在不断提高,一定会取得更多具有世界影响的研究成果。

#### 参考文献

- [1] Yang C, Xue W, Fu H, You H, Wang X, Ao Y, Liu F, Xu P, Gan L, Wang L, Yang G, Zheng W. 10M-core scalable fully-implicit solver for nonhydrostatic atmospheric dynamics. in Proc. International Conference for High Performance Computing, Networking, Storage and Analysis (SC' 16), IEEE Press, 6:1-12, 2016.
- [2] Yang C, Cao J, Cai X-C. A fully implicit domain decomposition algorithm for shallow water equations on the cubed-sphere. SIAM J. Sci. Comput. 32, 418-438 (2010).
- [3] Yang C, Cai X-C. Parallel multilevel methods for implicit solution of shallow water equations with nonsmooth topography on the cubed-sphere. J. Comput. Phys. 230, 2523-2539 (2011).
- [4] Yang C, Xue W, Fu H, et al. A Peta-scalable CPU-GPU algorithm for global atmospheric simulations. in Proc. 18th ACM SIGPLAN Symposium on Principles and Practice of Parallel Programming (PPoPP' 13), ACM Press, 1-12. 2013.
- [5] Xue W, Yang C, Fu H, et al. Enabling and scaling a global shallow-water atmospheric model on Tianhe-2. in Proc. 28th IEEE International Parallel & Distributed Processing Symposium (IPDPS' 14), IEEE Press, 745-754, 2014.
- [6] Xue W, Yang C, Fu H, et al. Ultra-scalable CPU-MIC acceleration of mesoscale atmospheric modeling on Tianhe-2. IEEE Transactions on Computers 64, 2382-2393 (2015).
- [7] Rudi J, Malossi C, Issac T, et al. An extreme-scale implicit solver for complex PDEs: highly heterogeneous flow in earth's mantle. in Proc. International Conference for High Performance Computing, Networking, Storage and Analysis (SC' 15), ACM Press, 5:1-12, 2015.
- [8] Cai X-C, Sarkis M. A restricted additive Schwarz preconditioner for general sparse linear systems. SIAM J. Sci. Comput. 21, 792-797 (1999).
- [9] Chow E, Patel A. Fine-grained parallel incomplete LU factorization. SIAM J. Sci. Comput., 37, C169-C193 (2015).

## 作者简介



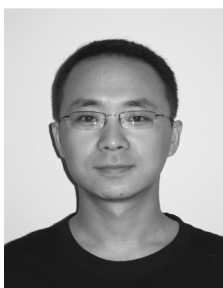
杨超，中国科学院软件研究所研究员、博导，主要研究方向为科学与工程计算、高性能计算等，研究成果曾获美国计算机学会“戈登·贝尔”奖、中国科学院杰出科技成就奖、CCF-IEEE CS 青年科学家奖、中国科学院卢嘉锡青年人才奖等荣誉。



薛巍，清华大学计算机科学与技术系副研究员，主要研究方向是大规模科学计算。



付昊桓，清华大学地球系统科学系副教授、国家超级计算无锡中心副主任，主要研究方向是面向地学的高性能计算。



尤洪涛，国家并行计算机工程技术研究中心副研究员，主要研究方向是高性能计算系统软件。



王兰宁，北京师范大学全球变化与地球系统科学研究院教授，主要研究方向是数值预报与大气环流模拟。

## 中国人工智能的科研现状分析与展望

唐 杰 袁 莎 周 源

（清华大学计算机系）

### 摘 要

随着人工智能（Artificial Intelligence, AI）的快速发展与应用，计算机技术已经进入以人工智能为代表的新信息技术（Information Technology）时代——智能技术时代（Intelligent Technology）。近两年来，人工智能快速助力国家科技信息化建设，人工智能研究在中国已经被提升到了国家发展战略的高度。本文探索了人工智能的起源与发展，及其在中国的发展历程，给出了中国人工智能的研究方法和领域分类。科技情报大数据分析挖掘与服务平台 AMiner 是中国自主研发，具有独立知识产权的，也是至今访问量最大的学术科技大数据分析与挖掘系统。AMiner 是中国在科技信息化应用实践方面的成功案例，其在科技信息化的分析方面具有天然的优势。本文基于 AMiner 平台中开放的科技信息数据集，用数据说话，从专家、论文和专利三方面分析了中国人工智能的科研现状，列举了中国人工智能在语音识别、人脸识别、自动驾驶和无人机等方面的实践应用。最后，结合前面各类科技信息数据集的分析，本文探讨了人工智能在中国发展的机遇和挑战。总体上说，本文基于权威科技情报大数据分析挖掘与服务平台，对中国人工智能的科研现状进行了分析和展望，填补了中国人工智能研究在权威现状分析方面的空白。

### 关键词

人工智能；科研现状；应用实践；机遇挑战

### Abstract

With the rapid development and application of Artificial Intelligence (AI), the computer technology has entered the era of new Information Technology (IT) called Intelligent Technology. AI can accelerate the information construction of science and technology. In the past two years, the AI research has been promoted to the level of the national development strategy in China. This paper explores the origin and development of AI, and the AI development in China. AMiner, a big data analysis and service platform for science and technology, is independently developed by China. It is a successful case in the informatization of science and technology in China. Based on the open dataset of AI in AMiner, we give the classification of the AI research in China. We overview the AI research situation in China based on the experts, papers and patents analysis. The AI applications, such as speech recognition, face recognition, automatic driving and so on, are introduced in the paper. We also discuss the opportunities and challenges of AI in China. In general, this paper fills the gaps in the authoritative analysis of the AI research situation in China.

### Keywords

Artificial Intelligence; Research Situation; Application; Opportunity and Challenge



## 1 引言

2016年5月18日,国家发展改革委、科技部、工业和信息化部、中央网信办四个部门联合制定了《“互联网+”人工智能三年行动实施方案》,旨在充分发挥人工智能技术的引领作用,支撑各行业领域“互联网+”创业创新。2017年3月5日,在第十二届全国人民代表大会第五次会议上,政府工作报告中首次出现了“人工智能”字眼。在本次政府工作报告中,李克强总理特别指出全面实施战略性新兴产业发展规划,加快新材料、新能源、人工智能、第五代移动通信等技术研发和转化,做大做强产业集群。2017年7月20日,国务院正式发布了《新一代人工智能发展规划》,规划中指出,人工智能发展进入新阶段,人工智能已经成为国际竞争的新焦点、经济发展的新引擎,为社会建设带来了新机遇和新挑战。

我国发展人工智能具有良好的基础。经过多年的持续积累,我国国际科技论文发表数量和发明专利已经跃居世界第二,人工智能部分领域的核心关键技术实现突破,自然语言处理、语言识别、计算机视觉等领域技术处于世界领先水平,自动驾驶、无人机、生物特征识别等领域进入实际应用。我国的人工智能企业正在加速成长,获得了国际资本市场的广泛认可和关注。与此同时,我国人工智能整体发展水平与美国相比仍然存在显著的差距。由此可见,目前在我国人工智能的发展进程中,成果与差距并存,机遇与挑战并存。

本文从人工智能的发展历史出发,回顾了人工智能发展的三起两落,整理了人工智能在中国的发展历史。随后,本文在给出中国人工智能领域划分的基础上,深入统计分析了中国人工智能的科研现状,包括目前中国人工智能专家数量、中国人工智能专家分布情况、中国在人工智能领域发表论文和专利的数量。基于中国人工智能的科研现状分析,探讨了人工智能在中国拥有的机遇和面临的挑战,旨在为人工智能在中国的发展提供参考和指导。

## 2 人工智能的发展历史

如今,人工智能在世间再次掀起一股热潮,人们随处都可以听到“人工智能”这个词。为何说是再次呢?其实,在此次热潮出现之前,人工智能也曾出现过两次热潮。接下来,我们梳理了人工智能的前世今生,不仅回顾了前两次人工智能研究热潮的情况,还追溯了历史上一些伟大的科学家和思想家所做的贡献,他们的研究成果为人工智能研究做了长足和充分的准备。

### 2.1 人工智能的起源

人工智能的历史不能只狭隘地从人工智能概念的产生算起。哲学、数学、经济学、神经科学、心理学、计算机科学、控制论和语言学等学科都促进了人工智能的产生和发展。作为中国人工智能领域研究的开拓者之一,陆汝钤院士在其著作《人工智能》中给出了为人工智能这门学科的产生做出过重大贡献的学者概要清单<sup>[1]</sup>。

古希腊哲学家和思想家亚里士多德(Aristotle,公元前384—322年)的代表作《工

具论》为形式逻辑奠定了基础。培根（Bacon，1561—1626 年）系统地提出了归纳法，成为和演绎法相辅相成的思维法则。培根还强调了知识的重要性，提出了著名的警示语句“知识就是力量”。莱布尼茨（Leibnitz，1646—1716 年）提出了数理逻辑，将形式逻辑符号化，从而能对人的思维进行运算和推理。布尔（Boole，1815—1864 年）初步实现了思维符号化和数学化，他提出了布尔代数，解决了传统逻辑不能处理的问题。

哥德尔（Gödel，1906—1978 年）研究形式系统的完备性和可判定性问题，指出了把人的思维形式化和机械化的某些极限，在理论上证明了有些事情是做不到的，为人工智能指明了相关研究极限。图灵（Turing，1912—1954 年）提出了图灵机，为电子计算机的出现建立了理论依据，他在 1950 年提出的“图灵实验”首次对智能的标准给出了一个明确定义。美国神经生理学家麦卡洛克（McCulloch，1898—1969 年）在 1943 年建立了第一个神经网络数学模型，奠定了用模拟人脑来实现智能研究的基础，开创了微观人工智能。美国物理学家莫奇来（Mauchly，1907—1980 年）于 1946 年发明了第一台电子数字计算机 ENIAC，为人工智能研究奠定了物质基础。香农（Shannon，1916—2001 年）于 1948 年开创了信息论，将其与心理学结合形成了认知心理学。认知心理学提出了各种描述人的心理活动的数学模型，形成了宏观人工智能研究的潮流。

## 2.2 人工智能的发展

“人工智能”这个名词于 1956 年在美国 Dartmouth 会议上正式被提出。此次会议中人工智能学术研讨会的参会者有 McCarthy、Minsky、Marvin、Shannon、Moore 等一批著名的数学家、信息学家、心理学家、神经生理学家和计算机科学家。这次大会被视为人工智能作为一门独立学科正式诞生的日子。此次会议推动了第一次人工智能研究热潮于 20 世纪 60 年代左右产生，此时，关于人工智能的研究主要是基于推理和搜索进行了一些定理证明。1958 年，Perceptron<sup>[2]</sup> 的出现将人工智能研究推向第一个高峰。然而，由于人工制定规则的限制和计算能力的限制等原因，这时期的人工智能对复杂的现实问题束手无策。随后在 20 世纪 70 年代，人工智能的研究进入了低谷期。

20 世纪 80 年代，引入了知识描述和知识管理的专家系统使得人工智能进入第二次研究热潮。然而，由于知识描述和知识管理的局限性，以及 Minsky 证明了传统感知机没法解决异或问题，导致人工智能于 20 世纪 90 年代中期进入了第二次低谷期。1991 年，IBM 的超级国际象棋计算机“深蓝”战胜了象棋冠军。虽然它还是基于规则式的逻辑推理模型，但是它基于计算机硬件的发展拥有了强大的计算能力。

20 世纪 90 年代后期随着搜索引擎的诞生，互联网在全球范围内得到了爆炸性地普及。进入 21 世纪，随着 Web 技术的发展，运用海量数据的机器学习技术迅速崛起。Hinton 于 2006 年提出的深度学习技术在图像处理和语音识别等领域取得了突破性进展，开启了人工智能的第三次研究热潮。随着大数据、云计算和深度学习等新技术的发展，人工智能的研究热潮达到了前所未有的高度。

## 2.3 中国人工智能的发展

相比于世界发达国家人工智能的发展，我国的人工智能研究起步晚，发展道路曲

折，甚至一度受到打压。直到中国改革开放后，中国人工智能的发展才步入正轨。虽然，我国人工智能研究的发展历程十分艰难，但是我国人工智能研究一直在曲折的道路中前进，并且取得了丰硕的成果。

20 世纪 60 年代，国际上出现第一次人工智能研究热潮时，中国受苏联批判人工智能和控制论的影响几乎没有人工智能研究。20 世纪 80 年代，当人工智能研究出现第二次热潮时，中国赶上了改革开放，人工智能的研究在中国被解开了禁锢，开始了艰难起步阶段。这一时期，知识工程和专家系统在世界发达国家迅猛发展，并取得了重大的经济效益。中国自 1980 年起派遣大量留学生赴欧美发达国家学习现代科技新成果，其中就包括人工智能和模式识别等学科领域。1981 年，中国人工智能学会成立，对人工智能在中国的研究发展起到了极大的促进作用。20 世纪 80 年代中后期，中国人工智能研究开始走上正常快速的发展道路，国家科研计划中出现了人工智能的相关研究项目。

进入 21 世纪后，许多人工智能研究项目获得国家科技重大专项、国家高技术研究发展计划（863 计划）、国家重点基础研究发展计划（973 计划）、国家自然科学基金重点和重大项目等各类国家科研基金的支持。在这些国家基金计划的支持下，各大高校培育了人工智能学科，开设各种层次的人工智能课程，培养了大批科技人员从事人工智能学科的研究。

近两年来，人工智能研究在中国已经被提升到了国家发展战略的高度。国务院发布的《新一代人工智能发展规划》指出，人工智能的战略目标分三步走：第一步，到 2020 年人工智能总体技术和应用与世界先进水平同步，人工智能产业成为新的重要经济增长点，人工智能技术应用成为改善民生的新途径，有力支撑进入创新型国家行列和实现全面建成小康社会的奋斗目标。第二步，到 2025 年人工智能基础理论实现重大突破，部分技术与应用达到世界领先水平，人工智能成为带动我国产业升级和经济转型的主要动力，智能社会建设取得积极进展。到 2030 年人工智能理论、技术与应用总体达到世界领先水平，成为世界主要人工智能创新中心，智能经济、智能社会取得明显成效，为跻身创新型国家前列和经济强国奠定重要基础。

### 3 人工智能的研究手段

人工智能是多学科交叉融合产生的新领域，多学科相互交融带来了多元观点的争论与冲突、修正与提高。在人工智能研究的发展过程中，由于研究学者对“智能”本质的理解和认识不同，学者对人工智能研究采用了不同的研究方法和手段，形成了不同的人工智能研究学派。目前人工智能研究手段主要分为三个学派：符号主义（也称为逻辑学派）、行为主义（也称为控制论学派）和连接主义（也称为仿生学派）。

符号主义是一种基于逻辑推理的智能模拟方法，其原理主要为物理符号系统假设和有限合理性原理。该学派认为人类认知和思维的基本单元是符号，而认知过程就是在符号表示上的一种运算。符号主义致力于用计算机的符号操作来模拟人的认知过程，通过研究人类认知系统的功能机理，用某种符号来描述人类的认知过程，并把这种符号输入到能处理符号的计算机中，从而模拟人类的认知过程，实现人工智能。物理符号系统假

设得到了方法论的保证：符号的使用以及符号系统作为描述世界的中介；搜索机制的设计，尤其是启发式搜索，用来探索这些符号系统能够支持的可能推理的空间；认知体系结构的分离，假定一个合理设计的符号系统能够提供智能的完整的因果理由，不考虑其实现的方法。基于这样的观点，最后人工智能变为经验式和构造式的学科，它试图通过建立智能的工作模型来理解智能。

行为主义认为智能行为的基础是“感知—行动”的反应机制，该学派基于智能控制系统的理论、方法和技术，研究拟人的智能控制行为。行为主义的基本观点可以概括为：知识的形式化表达和模型化方法是人工智能的重要障碍之一；智能取决于感知和行动，应直接利用机器对环境作用后，以环境对作用的响应为原型；智能行为只能体现在世界中，通过与周围环境交互而表现出来；人工智能可以像人类智能一样逐步进化，分阶段发展和增强。早期的研究重点是模拟人在控制过程中的智能行为和作用，对自寻优、自适应、自校正、自镇定、自组织和自学习等控制论系统的研究。到 20 世纪 60、70 年代，上述控制论系统的研究取得一定进展，并在 80 年代诞生了智能控制和智能机器人系统。行为主义的兴起，使得控制论和系统工程的思想融入人工智能的研究中。

连接主义是一种基于神经网络及网络间的连接机制与学习算法的智能模拟方法。其原理主要为神经网络和神经网络间的连接机制和学习算法。这一学派的主要观点认为，大脑是一切智能活动的基础，因而从大脑神经元及其连接机制出发进行研究，研究清楚大脑的结构以及它进行信息处理的过程和机理，有望揭示人类智能的奥秘，从而真正实现人类智能在机器上的模拟。该方法的主要特征表现在：以分布式的方式存储信息，以并行方式处理信息，具有自组织、自学习能力。正是这些特点，使得神经网络为人工智能的实现提供了新的可能。目前，由于计算存储技术的快速发展，深度神经网络和对抗生产网络等新技术将基于连接主义的人工智能研究推向了新高潮。

尽管各个学派在基本理论、研究方法和技术路线等方面各有不同，但它们都在实践中不断地推动着人工智能科学的发展。

## 4 中国人工智能的领域分类

上面探讨了人工智能的起源与发展，以及人工智能的研究手段，然而，关于“什么是人工智能？”或者说“人工智能的定义是什么？”还是模糊的。人工智能通常是指模拟生物智能开发的人造机器或程序，它表现出类似于生物的智能行为<sup>[3]</sup>。智能是很难准确定义的，在人工智能领域，图灵测试是用于判断计算机是否具有人类思维能力的测试方法，如果一台机器通过图灵测试即被认为具有人类智能。然而，无论是在科研界，还是在工业界，关于人工智能的定义至今都没有形成统一的定论。

本文没有执着于给出人工智能的统一定义，而是给出了中国人工智能的研究领域划分。人工智能既是计算机科学的一个分支，又是计算机科学、控制论、信息论、语言学、神经生理学、心理学、数学、哲学等多种学科相互渗透而发展起来的综合性学科。在此原则下，我们基于国际计算机学会（Association for Computing Machinery, ACM）计算分类系统 CCS2012<sup>[4]</sup> 构建了中国人工智能领域分类树。



ACM 计算分类系统是计算领域较为权威标准的分类系统，被应用在 ACM 数字图书馆系统中。ACM 计算分类系统对计算学科相关领域、类别和概念的归纳代表了计算学科分类的最高水平。中国人工智能的领域分类是以 ACM 计算分类系统（CCS2012）为基础构建的。ACM 计算分类系统包含信息安全、软件工程、计算方法等 13 个一级计算机领域。首先筛选与人工智能相关的领域及概念。我们主要选择计算方法领域下与人工智能密切相关的两个子领域——人工智能和机器学习。除了传统人工智能领域，近年来，人工智能在其他计算领域和跨学科领域的应用也越来越广泛，因此我们增加了其他子领域下和人工智能相关的概念，包括计算经济学、类脑科学等。

通过进一步组织，我们重构了中国人工智能的领域分类树。根据 Aminer 前期采样的中国人工智能领域的专家数据<sup>[5]</sup>，中国人工智能领域分类树主要被分为两级。根据当前研究热度和研究领域，我们划分出 27 个一级概念，包括深度学习、信息检索等，代表了人工智能在国内和国际上比较活跃的子领域。二级目录参考 ACM 分类系统，删去没有中国学者研究的类别，添加中国特有的热门领域，如中文处理。如图 1 所示，最终得到的中国人工智能领域分类树共包含 27 个一级概念，44 个二级概念，囊括了中国人工智能发展的各个领域。

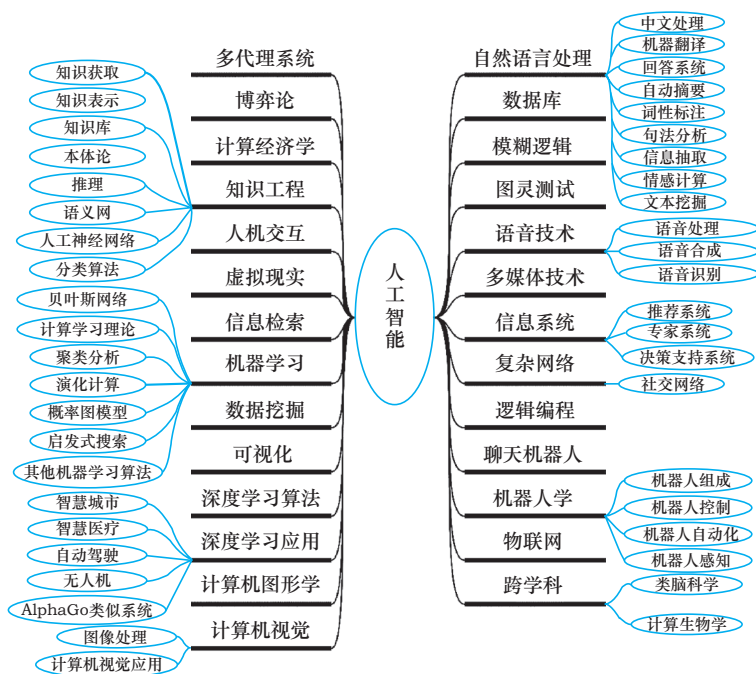


图 1 中国人工智能领域分类树

## 5 中国人工智能的科研现状

科技情报大数据分析挖掘与服务平台 AMiner<sup>[6]</sup>是由清华大学唐杰副教授带领研究团队自主研发的，这是中国最早研发的、具有独立知识产权的学术科技大数据分析



挖掘系统。系统在线运行十多年来,吸引了 220 个国家或地区 851 万个独立 IP 的访问。AMiner 是中国在科研信息化应用实践方面的成功案例,其在科研信息化的分析方面具有天然的优势。AMiner 建立了超过 2 亿学术论文和专利,以及 1.3 亿学者的科技智库。在 AMiner 中,根据上节划分的人工智能领域,本节对人工智能相关数据集进行了挖掘分析。依据科技信息数据集和分析结果来了解当前人工智能在中国的科研现状。其中,AMiner 开放数据集下载地址为: <https://www.aminer.cn/data>。

### 5.1 全球人工智能专家分布现状

依据中国人工智能领域分类树,我们在 AMiner 中统计了人工智能所有子领域的专家学者数量。全球人工智能专家共有 18 107 人,其中:

(1) 男性人工智能专家 17 231 人,女性人工智能专家 876 人。在全球人工智能专家中,男性占比为 95.16%,女性仅占 4.84%。

(2) 在全部人工智能专家中,华裔科学家占比为 26.69%,具有中国籍的人工智能专家占比为 14.77%。在具有中国籍的人工智能专家中,内地地区专家占比为 91.13%(占全世界比例为 13.46%),港澳特别行政区专家占比为 8.87%(占全世界比例为 1.31%)。

(3) 资深人工智能专家( $H\ Index \geq 30$ )共 4 918 人,占全球人工智能专家总数的 27.16%。在全球资深人工智能专家中,华裔科学家占比为 22.61%,具有中国籍的人工智能专家占比为 10.94%。在具有中国籍的资深人工智能专家中,内地地区专家占比为 82.72%(占全世界比例为 9.05%),港澳特别行政区专家占比为 17.28%(占全世界比例为 1.89%)。

(4) 领军人工智能专家( $H\ Index \geq 60$ )共 742 人,占全球人工智能专家总数的 4.10%。在全球领军人工智能专家中,华裔科学家占比为 16.06%,具有中国籍的人工智能专家占比为 6.36%。在具有中国籍的领军人工智能专家中,内地地区专家占比 74.06%(占全世界比例为 4.71%),港澳特别行政区专家占比为 25.94%(占全世界比例为 1.65%)。

全球人工智能专家共分布在全球 67 个不同的国家和地区。在全球人工智能专家中,资深人工智能专家共分布在全球 43 个不同的国家和地区,领军人工智能专家共分布在全球 25 个不同的国家和地区。全球人工智能专家分布如表 1 所示,表 1 只列出了占比在 1% 以上的国家和地区。从表 1 中可以看到,在全球人工智能专家中,占比最多的前三名是美国(39.71%)、中国(16.43%)和英国(6.3%),这三个国家的人工智能专家数量对比其他国家和地区具有绝对优势。然而在全球资深人工智能专家和领军人工智能专家数目上,美国(分别为 54.13% 和 68%)占比多于全球其他地区专家数目的总和。

由表 1 可知,中国在全球人工智能专家、全球资深人工智能专家和全球领军人工智能专家数量中占比分别为 16.43%(美国占比为 39.71%)、10.94%(美国占比为 54.13%)和 6.36%(美国占比为 68%)。虽然目前中国的人工智能专家数量在全球占比中列第二名,但是与第一名美国的差距仍然很大。专家越资深,中国与美国的专家数目差距越大。由此可见,中国的人工智能科研现状虽然取得了一定的成绩(全球排名第

二)，但是与第一名美国仍然存在很大的差距，需要国家在人工智能人才培养方面继续加大投入。

表 1 全球 AI 专家分布

国 籍 \ 类 别	AI 专家	资深 AI 专家	领军 AI 专家
美国	39.71%	54.13%	68%
中国	16.43%	10.94%	6.36%
英国	6.3%	6.21%	5.18%
意大利	3.69%	2.41%	1.18%
加拿大	3.66%	3.97%	3.29%
日本	3.61%	1.67%	—
德国	2.92%	2.27%	1.65%
澳大利亚	2.58%	2.01%	1.41%
荷兰	2.57%	2.35%	1.41%
法国	1.93%	1.1%	—
新加坡	1.86%	1.85%	—
印度	1.61%	1.02%	—
希腊	1.36%	—	—
以色列	1.19%	1.86%	2.12%
西班牙	1.17%	—	—
瑞士	1.15%	1.33%	1.4%
奥地利	1.06%	—	—
比利时	1.03%	—	—
其他国家或地区	6.17%	6.88%	8%

5.2 中国人工智能学者现状

我们统计了中国四个权威机构的数据，包括中国电子学会（Chinese Institute of Electronics, CIE），中国中文信息学会（Chinese Information Processing Society of China, CIPSC），中国自动化学会（Chinese Association of Automation, CAA）和中国计算机学会（China Computer Federation, CCF）。

表 2 列出了中国这四大学会各自涉及的领域中，与人工智能领域相关的部分。其中，中国电子学会涉及人工智能的主要研究领域包括：嵌入式系统与机器人、计算机工程与应用。中国中文信息学会涉及人工智能的主要研究领域包括：计算语言学、社交媒体处理。自动化学会涉及人工智能的主要研究领域包括：机器人、模式识别与机器智能、智能自动化。中国计算机学会涉及人工智能的主要研究领域包括：多媒体技术、计算机辅助设计与图形学、计算机视觉、计算机应用、人工智能与模式识别、人机交互、数据库、信息系统、虚拟现实与可视化技术、中文信息技术、大数据、生物信息学。

表 2 四大协会领域分析

中国电子学会	嵌入式系统与机器人，计算机工程与应用
中国中文信息学会	计算语言学，社会媒体处理
自动化学会	机器人，模式识别与机器智能，智能自动化
中国计算机学会	多媒体技术，计算机辅助设计与图形学，计算机视觉，计算机应用，人工智能与模式识别，人机交互，数据库，信息系统，虚拟现实与可视化技术，中文信息技术，大数据，生物信息学

在四大学会的会员中，从事人工智能相关领域的学者共 1 073 名，分别有 1 045 名来自高校，89 名来自科研机构，22 名来自企业。这些数量的总和不等于 1 073，由此可推断，有一些人工智能学者同时在多个不同类型的单位就职。目前在中国，有 97.39% 的人工智能学者都任职于高校，远远多于在科研机构和企业任职的人工智能专家。本文统计各单位人工智能学者人数后，将人工智能学者人数最多的前 15 个单位列出，如图 2 所示。在中国，人工智能学者数量最多的三个单位是清华大学、北京大学和中国科学院，分别有 72 名、66 名、51 名人工智能专家。这三个单位的人工智能学者数远多于其他单位。

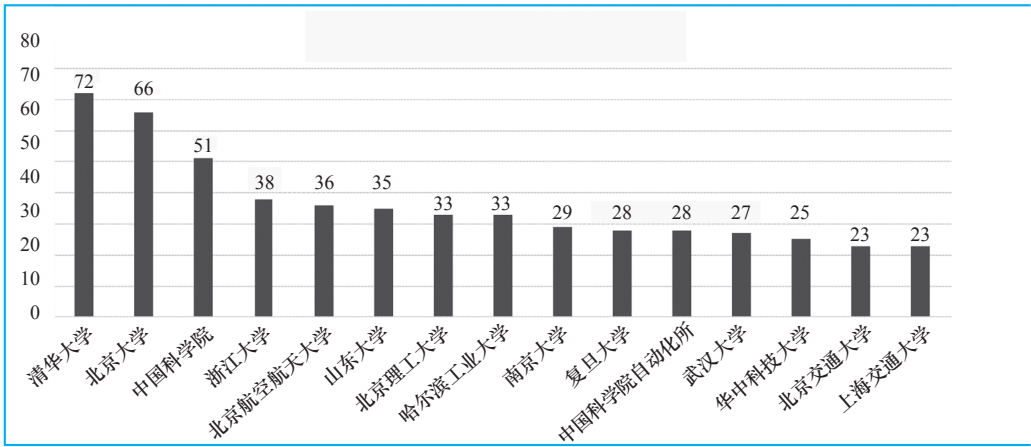


图 2 中国 AI 学者单位分布

同样地，我们统计了四大学会中人工智能学者的领域分布。如图 3 所示，中国人工智能学者主要分布在以下领域：数据挖掘、机器学习、计算机视觉、数据库、自然语言处理、图像处理、计算机图形学、多媒体技术、虚拟现实、人机交互、信息检索以及社交网络等。其中，数据挖掘（230 人）、机器学习（207 人）、计算机视觉（193 人）和数据库（171 人）领域的人才充足，而在机器人、跨学科计算与机器学习应用等领域稍显薄弱。同时，人工智能领域呈现出跨学科的特点，大部分学者的专业是计算机相关专业（如计算机、电子工程、数学等），但少部分学者专业为与计算机不明显相关的专业，如经济学、生物、心理学等。

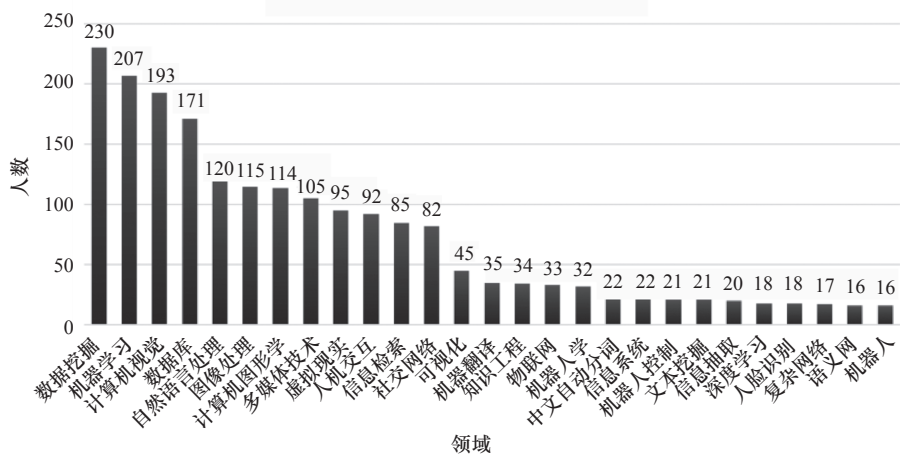


图 3 中国 AI 学者领域分布

5.3 中国人工智能论文现状

本文统计近 2 年人工智能领域发表的国际顶级会议论文（CCF-A 和 CCF-B 类），以此作为本节分析的基础数据。本文统计得到 5 573 篇论文，其中有 1 554 位中国学者。

按照人工智能领域的分类树，将每篇论文归类至相关的领域，从而该领域作为论文中每位作者的研究领域。如图 4 所示的统计结果显示，含 50 位中国学者以上的（一级）领域有：机器学习（796 人，占总数的 51.22%）、计算机视觉（334 人，占总数的 21.49%）、自然语言处理（204 人，占总数的 13.13%）、社交网络（84 人，占总数的 5.41%）、多代理系统（61 人，占总数的 3.93%）、知识工程（59 人，占总数的 3.80%）、知识表示（54 人，占总数的 3.47%）和推荐系统（53 人，占总数的 3.41%）。中国学者发表的顶级论文涉及的这些领域也是人工智能在国际上比较活跃的子领域。

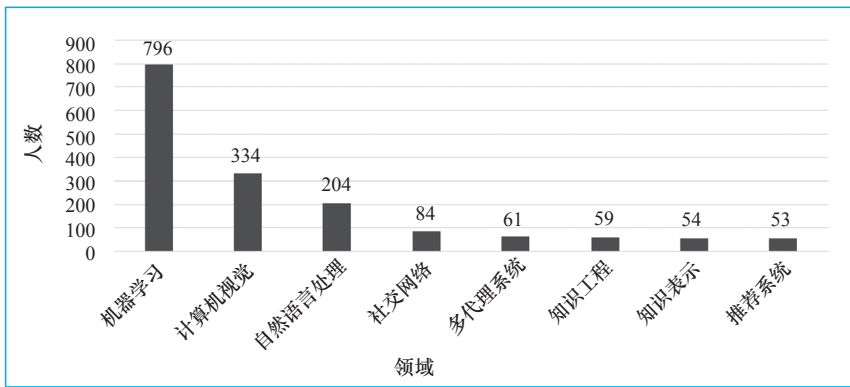


图 4 中国顶级 AI 论文的作者数量

将所有论文的作者按照所在机构进行分类，并且按照机构的学者数量进行排序，得

到的结果如图 5 所示：中国科学院位列第一（127 人）、清华大学（94 人）和北京大学（51 人）紧随其后，前十名的机构还有：微软（48 人）、中国科学技术大学（35 人）、南京大学（34 人）、哈尔滨工业大学（30 人）、香港中文大学（25 人）、卡内基梅隆大学（24 人）、复旦大学（24 人）以及上海交通大学（23 人）。在统计结果中值得注意的是，国外和香港研究机构的中国学者发表的顶级论文数量也都表现很突出。

下面我们关注论文作者中学生的分布情况。我们借助 AMiner 系统中学者的个人资料和在互联网上搜索到的学者信息，标注得到 452 位学生，1 102 位教授或研究员。有了学者的职位信息后，再将学者按机构分类。由图 5 可知，大部分国内大学中，教授的数量多于学生，如清华大学有 64 位老师，30 位学生；北京大学有 40 位老师，11 位学生。对于国外的大学，则经常是学生多于老师，如卡内基梅隆大学有 4 位老师，20 位学生。

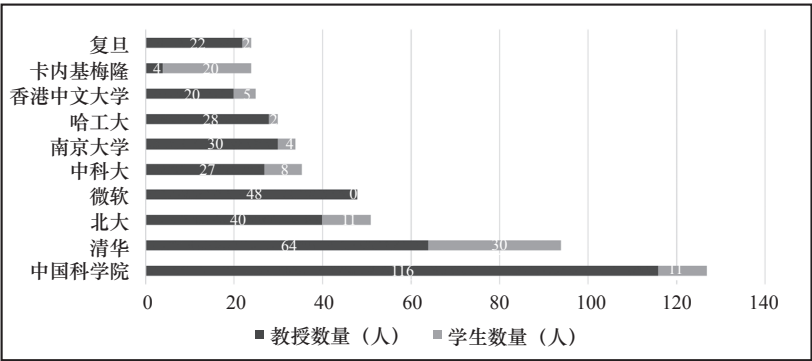


图 5 论文作者中教授数量与学生数量对比图

然后，我们选取了人工智能领域内的 12 个具有代表性的子领域，包括计算机视觉、机器学习、自然语言处理、机器人学、神经网络、不确定知识与推理、多智能体系统、计算学习理论、演化计算、知识工程、自动化决策与调度，以及推理。在 AMiner 系统中统计从 2015 年至今，中国和外国学者在这些领域发表的论文数量，如表 3 所示。其中发表论文按照人次统计，并且按照中国学者所占比例对这 12 个领域进行了排序。

表 3 中国和外国学者发表论文数量

人 数				
领 域	总人次 (人)	外国学者 (人)	中国学者 (人)	中国学者比例 (%)
计算机视觉	13 200	9 003	4 197	31.795 45
机器学习	5 701	3 999	1 702	29.854 41
自然语言处理	6 471	4 622	1 849	28.573 64
机器人学	7 251	5 666	1 585	21.859 05
神经网络	2 927	2 346	581	19.849 68



(续表)

人 数 领 域	总人次 (人)	外国学者 (人)	中国学者 (人)	中国学者比例 (%)
不确定知识与推理	599	487	112	18.697 83
多智能体系统	2 312	1 974	338	14.619 38
计算学习理论	381	327	54	14.173 23
演化计算	596	546	50	8.389 262
知识工程	459	428	31	6.753 813
自动化决策与调度	360	338	22	6.111 111
推理	382	368	14	3.664 921

5.4 中国人工智能专利现状

本文专利情况分析主要是基于国家专利局的相关数据。AI 专利涉及的研究领域基本覆盖了 AI 研究的各个方向，其中在数据库（38038）、机器学习（13877）、人机交互（9969）、大物联网（8929）、大数据（5055）、语音技术（4835）、虚拟现实（3577）、数据挖掘（1422）、深度学习（786）、自然语言处理（819）、机器人学（1547）等领域尤为活跃。在计算生物学（1）、量子智能计算（0）、类脑科学（0）等领域，由于技术的成熟性问题，专利数量极少。另外，在人工智能的实践应用中，无人机（9356）、人脸识别（3207）、社交网络（710）、自动驾驶（647）等 AI 具体应用方向专利数量可观。

根据美国专利数据库 USPTO 从 1976 年至今的专利情况，本文对比了中美两国的 AI 专利申请情况。美国的 AI 专利也主要集中在机器学习（287855）、图像处理（171852）、自然语言处理（48659）、图形学（32168）、语音识别（31410）、机器人学（29892）、计算机视觉（22803）、数据挖掘（18140）等领域，整体分布比例上和我国的 AI 专利十分类似，而在量子智能计算（636）、计算生物学（1559）等我国 AI 专利极为稀少（分别为 0 和 1）的方向表现也较为活跃。

我们以深度学习为例分析 AI 专利在中国的发展趋势。统计结果如图 6 所示，2012 年暂无深度学习相关的专利，2013 年申请的深度学习专利数为 31 项，2014 年为 80 项，2015 年为 237 项，2016 年为 465 项。在图 6 中，我们以指数函数模拟中国深度学习专利数量的增长趋势，可见深度学习作为 AI 领域最热门的研究应用方向之一，自 2012 年火热以来，专利数井喷，并仍呈持续上升势头。而在美国专利数据库 USPTO 中搜索得到的深度学习条目总数只有 242 条。可见近年来，我国在 AI 领域的某些子领域内年专利数量超过了美国，并且增长势头强劲。

以下统计分析基于我们随机抽取的 2015 年 1 月 1 日至今覆盖各个 AI 领域的 15 222 个 AI 相关的专利，AI 专利 41.47% 来源于计算机领域，其次是电子通信（13.64%）、控制（5%）等领域，并广泛应用于社会生产生活的各个方面。

在 AI 专利的机构成分分析方面，统计得到 61.62% 的专利来自各类企业，31.97% 来自各大专院校，5.12% 来自科研单位，其余的来自机关集团。如图 7 所示，AI 专利

申请最多的机构包括以乐视（428）、国家电网（328）、百度（241）、北京光年无限（130）等为代表的公司企业和以浙大（103）、东南大学（93）、华南理工（92）、清华（88）等为代表的理工科大学。AI 专利申请前 20 的机构中，企业占 11 家，高校占 9 家，而且企业的名次相对更高。整体数据上，AI 专利的主力军还是企业。

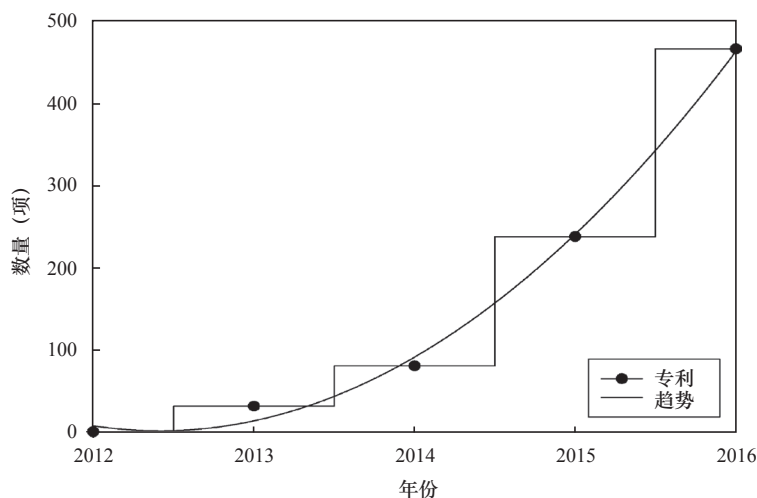


图 6 中国深度学习专利数量

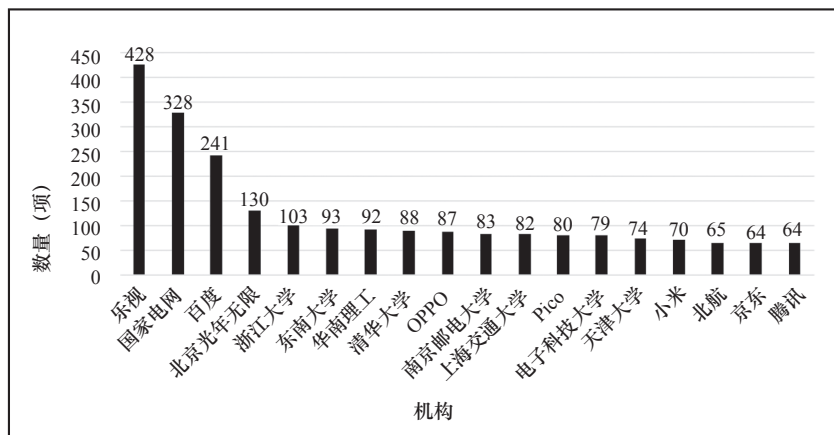


图 7 各机构的专利数量

在 AI 专利的省市地域分布上，专利申请数量最多的三个城市为北京、上海和深圳。具体地，专利申请单位在北京的占比为 20.41%，专利申请单位在深圳占比为 8.98%，专利申请单位在上海的占比为 7.30%。目前，这三个城市是中国 IT 产业最密集的城市，与统计结果相符。

## 6 人工智能在中国的应用实践

在人工智能的应用实践方面，国内互联网企业三巨头——百度、阿里和腾讯（简称BAT）纷纷成立以人工智能技术为核心的研究院，如百度的深度学习研究院、阿里巴巴和腾讯的人工智能实验室。以BAT为代表的中国企业在人工智能特定领域都取得了令人瞩目的应用实践成果。这些成果目前广泛应用于日常生活中，如交通、银行、电子商务、安保（包括指纹识别、语音识别、人脸识别、虹膜识别和步态识别等）、机器人视觉和导航等日常生活的方方面面。

本节依据第3节的人工智能领域树，列举了人工智能研究子领域在中国应用实践的成功案例，包括虚拟现实、深度学习应用（包括自动驾驶、无人机）、计算机视觉应用（包括人脸识别）、语音技术（包括语言识别）等方面。在这些应用实践中，中国的语音识别、人脸识别等技术已经处于世界领先地位。

### 6.1 虚拟现实

虚拟现实（Virtual Reality, VR）技术是基于计算机图形学、多媒体技术、计算机仿真技术、人机接口技术和传感器技术发展起来的一门新兴交叉学科。利用虚拟现实技术可以创建和体验虚拟世界的计算机仿真系统，使得用户可以沉浸到三维动态视觉景象和实体行为交互的模拟环境中。虚拟现实技术具有四个主要的特征，包括存在感、交互性、自主性和多感知性。我国虚拟现实技术研究虽然起步晚，与国际发达国家存在一定的差距，但是目前已经受到国家部门和科研学者的高度重视，根据我国的国情，制定并开展了一系列的虚拟现实技术研究计划。

目前虚拟现实在我国的应用实践已经推广到了科研、教育培训、工程设计、商业、军事、航天、医学、影视、艺术和娱乐等众多领域，全面提升了我国人民的日常生活品质。根据本文4.4节中对中国人工智能专利现状的分析，北京小鸟看看科技有限公司（Pico）在虚拟现实技术领域的专利数处于国内领先地位。Pico 现已囊括 110 项已授权专利，范围涵盖图像、声学、光学、硬件与结构设计、操作系统底层优化、空间定位与动作追踪等虚拟现实领域的核心技术。另外，北京小米科技有限责任公司（简称小米）作为国内专注智能硬件和电子产品研发的移动互联网公司，在虚拟现实技术领域的应用实践也有诸多创新。2017 年，小米探索实验室研发的小米 VR 眼镜，荣获世界三大最具权威性设计奖项之一的日本优良设计奖。

### 6.2 深度学习应用

目前国内在深度学习应用领域耳熟能详的是自动驾驶和无人机。自动驾驶的实现依赖于深度学习技术的成熟。在传统的“车—路—人”闭环控制方式中，92% 的交通事故是由人为因素造成的，交通堵塞也大多与驾驶员违反交通规则有关。自动驾驶的成功实现将会从根本上改变传统的“车—路—人”闭环控制方式，形成“车—路”的闭环，从而能提高高速公路安全性，缓解交通拥堵，大大提高交通系统的效率和安全性。近几

年，自动驾驶研究蓬勃发展，无论是高科技互联网企业，还是各大传统汽车厂商，都相继进入自动驾驶研究领域。2017年4月，百度推出阿波罗计划，开源其自动驾驶平台，在国内以及世界范围内的自动驾驶领域投下一枚重磅炸弹。百度阿波罗计划将针对自动驾驶完成一套完整的软硬件和服务的解决方案，包括车辆平台、硬件平台、软件平台、云端数据服务四大部分。阿波罗自动驾驶开放平台向百度在汽车行业及自动驾驶领域的合作伙伴提供一个开放的软件平台，帮助它们结合车辆和硬件系统，快速搭建一套属于自己的完整的自动驾驶系统。

无人机早在20世纪80年代就在军事领域得到了应用，近几年更是成为军事和民用研究的热点，具有重大的军事和经济意义。在中国，大疆创新科技有限公司（简称DJI）是全球领先的无人飞行器控制系统及无人机解决方案的研发和生产商。通过持续的创新，大疆致力于为无人机工业、行业用户以及专业航拍应用提供性能最强、体验最佳的革命性智能飞控产品和解决方案。现在无人机已经应用到农业、能源、公共安全、基础设施和建筑等各方面。例如，通过无人机行业应用平台，能源公司可以实时掌控偏远地区的设备状况（包括风力发电站、石油和天然气设备检测、电力巡线和核电站巡检等），及时排除故障隐患，让维护工作更加高效、安全。在公共场所的突发事件中，无人机能进行大范围监控和搜索，迅速传递现场情况，提升反应效率，目前已被应用于搜救、消防、救灾和执法等领域。

商汤科技专注于深度学习的原创技术，建立了国内顶级的自主研发的深度学习超算中心，是目前中国一流的人工智能算法供应商。目前，商汤科技已与国内外多个行业的400多家领军企业建立合作，包括本田、Qualcomm、英伟达、中国移动、银联、万达、苏宁、海航、中央网信办、华为、小米、OPPO、vivo、微博、科大讯飞等知名企业及政府机构，涵盖安防、金融、智能手机、移动互联网、汽车、智慧零售、机器人等诸多行业，为其提供基于人脸识别、图像识别、视频分析、无人驾驶、医疗影像识别等技术的完整人工智能解决方案。

### 6.3 计算机视觉

在计算机视觉领域的应用实践中，目前应用最广泛的是人脸识别。人脸识别是指在没有人为干预的情况下，系统基于自动采集的人的脸部特征信息进行身份识别的一种生物识别技术。人脸识别的应用领域涉及公安机关和银行系统的身份鉴定及认证、公众场所的视频监控、安全验证系统等。

人脸识别技术从20世纪60年代发展至今，人脸识别算法从最初需要依赖操作人员实现人脸灰度图模型，发展到目前全自动三维动态识别，人脸识别技术已经进入了商业实用化的阶段。根据专利分析可知，北京旷视科技有限公司在人脸识别方向具有的专利数处于国内领先地位。旷视科技是目前国内商用案例最多、应用最成熟的专注人脸识别的公司，它为支付宝、中信银行、无锡市公安局等对风控要求非常严苛的机构提供人脸识别服务。旷视科技旗下的Face++是一个提供免费人脸检测、人脸识别、人脸属性分析等服务的云端服务平台。

## 6.4 语音技术

语音是人类沟通和获取信息的手段和方式,智能语音技术在社会的各个领域都拥有广阔的产业化前景。语音技术的核心技术主要包括:语音识别技术、语音合成技术、语音评测技术、声纹语种技术等。中国在语音识别领域已经达到了国际领先水平。在语音识别领域的授权专利中,科大讯飞占据领先地位。科大讯飞作为中国智能语音产业领导者,在语音合成、语音识别、口语评测、自然语言处理等多项技术上拥有国际领先的成果。科大讯飞作为中文语音交互技术标准工作组组长单位,牵头制定了中文语音技术标准。讯飞输入法的语音识别率目前已达到98%,手写识别率为业界第一。2017年,科大讯飞入选全球50个最具创新能力的公司并且排名中国第一。

## 7 中国人工智能的机遇和挑战

机器学习的出现激发了第三次人工智能研究热潮,深度学习的兴起将第三次人工智能研究热潮推向高潮。随着目前云计算技术和大数据技术等现代计算机信息技术的发展成熟,第三次人工智能研究热潮在中国愈演愈烈。毫无疑问,目前人工智能研究处于历史上最好的时代,处处充满着生机,给科研界和工业界带来了庞大的机遇。但是,在庆幸处于这样好的时代的同时,我们同样需要时刻保持警醒,避免盲目乐观。在本节,我们列出了目前中国人工智能研究拥有的机遇,同时也给出了中国人工智能遭遇的几个方面的挑战。

### 7.1 中国人工智能拥有的机遇

目前,我国正处在全面建设小康社会的决胜阶段,面临着人口老龄化、资源环境约束等众多严峻挑战。政府部门已经将人工智能提升至国家政策层面,在此契机下,人工智能在中国迎来了前所未有的新机遇。本节将从政策层面、技术层面和应用层面三个不同层次分析目前中国实现人工智能的机遇。

(1) 政策层面。中国政府高度重视人工智能在国内的发展。习近平总书记多次强调指出,要加快创新驱动,抓住人工智能技术的发展机遇。李克强总理在2017年政府工作报告中提出要培育壮大人工智能等新兴产业。从2017年7月20日国务院颁发《新一代人工智能发展规划》,到10月13日发改委发布《关于组织实施2018年“互联网+”、人工智能创新发展和数字经济试点重大工程的通知》,不到三个月的时间,针对人工智能的国家政策就从战略到执行推进落地。如此高的效率,显示了我国政府在把握人工智能发展机遇方面的决心。

为抓住人工智能发展的重大战略机遇,政策层面已经指出了从以下四个方面构建我国的人工智能科技创新体系:构建新一代人工智能基础理论体系(包括大数据智能理论、跨媒体感知计算理论、混合增强智能理论、群体智能基础理论、自主协同控制与优化决策理论、高级机器学习理论、类脑智能计算理论、量子智能计算理论);建立新一代人工智能关键共性技术体系(包括知识计算引擎与知识服务技术、跨媒体分析推理技



术、群体智能关键技术、混合增强智能新架构和新技术、自主无人系统的智能技术、虚拟现实智能建模技术、智能计算芯片与系统、自然语言处理技术)；统筹布局人工智能创新平台建设(包括人工智能开源软硬件基础平台、群体智能服务平台、混合增强智能支撑平台、自主无人系统支撑平台、人工智能基础数据与安全监测平台)；加快培养聚集人工智能高端人才(包括培育高水平人才智能创新人才和团队，加大高端人工智能人才引进力度，建设人工智能学科)。

(2) 技术层面。本次人工智能研究热潮的兴起源于新兴计算机技术的发展，特别是大数据技术、云计算技术和深度学习技术的发展与成熟。目前成功应用于语音识别、计算机视觉和自动驾驶等领域的人工智能依赖于海量大数据的积累，云计算平台的成熟与开放，以及深度学习技术的突破。从技术层面来看，大数据技术、云计算技术和深度学习技术的成熟应用，直接导致人工智能在近两年的爆发。基于这三项基础技术，人们正在大步迈向解放生产力和变革生活方式的人工智能时代。

在移动互联网的广泛应用和 Web 2.0 技术的成熟应用背景下，海量数据的迅猛积累并且以几何倍数持续增长，促使数据的高效采集、处理和挖掘。大数据技术能够实时、高效、可视化地处理各种类型数据，使用户按需求获取分析和预测结果。云计算技术通过互联网向用户提供动态的、易扩展的、虚拟化的强大计算资源。借助云计算技术，海量数据能够得到快速存储与管理、计算和分析。数据量越来越大，计算能力越来越强，促使深度学习技术的出现与成熟。深度学习技术的核心是旨在模拟人脑进行学习分析的多层神经网络，区别于普通的机器学习技术，深度学习不再依赖于人工设计特征，而是从数据中自己学习得到。生成式对抗网络(Generative Adversarial Networks, GAN)的出现对深度学习领域解决实际问题的角度和思路产生了深远的影响。

(3) 应用层面。人工智能落地到医疗、教育、金融、家居等，将会为各个行业带来巨大的机遇。人工智能的许多应用正在日益改变人们的生活，促使人们跨入智能时代。在移动互联网技术不断发展和相关应用逐渐成熟的基础上，互联网+人工智能将带动和促进传统产业的转型升级，引领新一轮的科技革命，成为国内经济增长的新引擎。

根据中国的人工智能发展战略目标，到 2020 年人工智能产业成为中国新的增长点，人工智能技术应用成为改善民生的新途径。拓展人工智能在生产生活、社会治理、国防建设各方面应用的广度深度，构建涵盖核心技术、关键系统、支撑平台和智能应用的产业链和产业群，人工智能核心产业规模超过 1 500 亿元，带动相关产业规模超过 1 万亿元。特别是在制造、农业、物流、金融、家居等领域重点开展人工智能应用试点示范，推动人工智能规模和应用，基于人工智能全面提升中国产业发展智能化的水平。

人工智能技术可准确感知、预测、预警基础设施和社会安全运行的重大态势，及时把握群体认知及心理变化，主动决策反应，将显著提高社会治理的能力和水平，对有效维护社会稳定具有不可替代的作用<sup>[7]</sup>。把握机遇，人工智能将在中国的城市管理、司法服务、公共安全、教育、医疗、养老等各个领域广泛应用，全面提升中国人民的生活品质，深入而长远地影响人们的生活方式。

## 7.2 中国人工智能遭遇的挑战

虽然关于“人工智能是否能达到人的智能水平?”这个问题在研究界一直存在争议,但是大家都公认“人工智能研究是非常困难的”。人工智能的困难性和不确定性为其发展带来了挑战。麦肯锡全球研究院的报告对全球 800 多种职业所涵盖的 2 000 多项工作内容进行分析后发现,全球约 50% 的工作内容可以通过人工智能技术实现自动化。人工智能这项影响面广的颠覆性技术,带来了改变就业结构、侵犯个人隐私、冲击法律与社会准则等问题。我国在大力发展人工智能技术的同时,必须高度重视可能带来的风险与挑战。本节从政策标准、隐私安全和技术难点三方面探讨人工智能面临的挑战。

(1) 政策标准。政府出台的政策标准是保证人工智能应用质量和合法性的社会使能支撑。人工智能带来的科技革命在改变人们的生活方式的同时,大量淘汰传统行业劳动力,带来社会就业结构的不稳定。国家在制定人工智能发展战略的同时,必须加强人工智能标准和规范的制定,出台法律法规并制定伦理道德框架,保障人工智能朝着健康的方向发展,开展与人工智能应用相关的民事与刑事责任认定,建立追溯和问责制度,明确人工智能法律主体的权利义务和相应的社会责任。特别是在目前广泛应用的虚拟现实、自动驾驶、无人机、人脸识别和语音识别等领域,加快研究制定相关安全管理法律法规,出台研发企业与研发人员的道德规则和行为守则,预先对人工智能应用进行收益和风险的评估,研究突发事件的应对措施。

(2) 隐私安全。具有颠覆性和革命性的人工智能技术在侵犯个人隐私、挑战经济安全和社会稳定等方面产生了重要影响。目前针对人工智能的监管制度尚未建立,隐私安全得不到有效保障。在政策标准和监管体系的作用下,建立人工智能对国家安全和保密领域影响的评估措施,构建安全监测预警机制,出台对数据滥用、侵犯个人隐私、违背道德伦理等行为的处罚措施。人工智能涉及的安全隐私风险存在于数据采集、存储和应用等各方面,随着人工智能技术的进步,从数据到知识的抽取能力也在快速提升,规范隐私安全保护是人工智能技术面临的主要挑战之一。

(3) 技术难点。知识表示和情感表现是人工智能突破发展的瓶颈。目前人工智能尚处于弱人工智能时期。例如,主人回家时,机器人会根据当天气温提前打开冷气或暖气,但尚未认知到冷气和暖气对其本身的差别。要想进入强人工智能阶段,必须借助于认知科学的研究,破解自主和情感等意识现象。在传统的心理学科中,认知是指人认识外界事物的过程,或者说是作用于人的感觉器官的外界事物进行信息加工的过程。认知科学旨在研究人脑和心智的工作原理,是一门心理学、计算机科学、神经科学、语言学、人类学等多学科交叉的新兴学科。人工智能要突破知识表示和情感表现的挑战,必须结合认知科学,才能进一步发展到强人工智能阶段。

## 8 结语

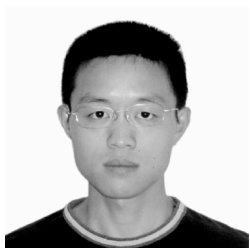
本文给出了中国人工智能研究的领域分类树,基于具有中国自主知识产权的科技情报大数据分析挖掘与服务平台 AMiner 中各类权威的科技信息数据集,从专家、论文和

专利三个方面概述了中国人工智能的科研现状。基于统计得到的专利数据,本文列举了中国人工智能在语音识别、人脸识别、自动驾驶和无人机等方面的实践应用。最后,从政策层面、技术层面和应用层面三个不同层次分析目前中国实现人工智能的机遇,从政策标准、隐私安全和技术难点三个方面探讨了人工智能面临的挑战。

### 参考文献

- [1] 陆汝钫. 人工智能(上册)[M]. 北京: 科学出版社, 1989.
- [2] Rosenblatt F. The perceptron: A probabilistic model for information storage and organization in the brain.[J]. Psychological Review, 1958, 65(6):386.
- [3] McCarthy J, Minsky M L, Rochester N, et al. A Proposal for the Dartmouth Summer Research Project on Artificial Intelligence[J]. Journal of Molecular Biology, 2006, 278(1):279-289.
- [4] <https://www.acm.org/about/class/class/2012>.
- [5] Tang J, Zhang J, Yao L, et al. ArnetMiner: extraction and mining of academic social networks[C]. ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining. DBLP, 2008:990-998.
- [6] <https://aminer.org>.
- [7] 国务院. 新一代人工智能发展规划, 2017.

### 作者简介



唐杰, 清华大学长聘副教授, 博士生导师, 研究方向为 Web 社会网络挖掘, 曾获 2017 北京市科技进步一等奖(排名第一)、2015 牛顿高级学者基金、2013 年中国人工智能学会科技进步一等奖(排名第一)、2013 年中国电子学会自然科学二等奖(排名第一)、2012 国家优秀青年科学基金、2012 年计算机学会青年科学家奖等。任现职以来主持国家级、部委级和国际合作项目 20 项; 在相关领域 CCF 指定的 A 类国际会议/期刊发表论文 70 余篇, Google Scholar 引用 9434 次, 个人 H 指数 49。主持研发了具有完全自主知识产权的以学者和知识为中心的科技情报大数据分析挖掘与服务平台 AMiner, 收录科技文献超过 2.3 亿, 论文引用关系超过 7.6 亿, 专家学者超过 1.3 亿, 提供面向科技文献、专利和科技新闻的语义搜索、语义分析、成果评价等知识服务。

## What is the European Cloud Initiative

**Cristina Martinez<sup>1</sup> Philippe Froissard<sup>2</sup>**

- (1. Deputy Head of infrastructure & Science Cloud Unit, the Directorate General for Communications Networks, Content and Technology, European Commission;  
2. Deputy Head of the Research Infrastructure Unit, Directorate General for Research and Innovation, European Commission)

Today the European Union (EU) has 1.7 million researchers and 70 million science and technology professionals engaged in the creation of new knowledge, products, services and processes. Underpinning their efforts, research infrastructures (such as large facilities, services or resources) and digital infrastructures (such as large communication networks or supercomputing capacity) foster innovation and scientific progress across disciplines and between the private and public sectors. Research infrastructures and digital infrastructures in Europe are the backbone of European research and a vital driver for innovation. Without them, there would be no development of new knowledge, no sharing of data and no exchange of know-how.

The European Commission, the executive of the European Union, adopted on 19 April 2016 the communication “European Cloud Initiative-Building a competitive data and knowledge economy in Europe” that sets out a strategy to strengthen Europe’s position in data-driven innovation, improve its cohesion and help create a Digital Single Market in Europe. This is a fundamental step towards the reinforcement of the EU’s competitiveness in digital technologies and in innovation. The European Cloud Initiative will provide European science, industry and public authorities with world-class data infrastructures, high-speed connectivity and increasingly powerful high performance computers. It will make it easier for researchers, and later businesses and public services to exploit the (big) data revolution benefits.

The initiative will establish the European Open Science Cloud (EOSC) as a virtual environment to store and process large volumes of information generated by research in line with the big data revolution. This will be supported by the European Data Infrastructure (EDI), deploying the high-bandwidth networks and the supercomputing capacity necessary to access and process large datasets stored in the cloud. Both the EOSC and the EDI will build on existing EU-funded research infrastructures and e-infrastructure and will bring networking, data and computing services closer to European researchers and innovators.

Finally, the EOSC aims to accelerate the transition to more effective Open Science and Open Innovation in a Digital Single Market by removing the technical, legislative and human barriers to the re-use of research data and tools, and by supporting access to services, systems

and the flow of data across disciplinary, social and geographical borders. It will foster best practices of global data findability and accessibility (FAIR data), help researchers get their data skills recognised and rewarded (careers, altmetrics) or help address issues of privacy, access and copyright. Our aspiration is that the European Cloud Initiative succeeds to create a trusted environment for hosting and processing (open) research data to support EU science in its global prominent role. We are committed to making it a success.

## Annex

On June 12, 2017, the stakeholders had a summit conference, which release the EOSC Declaration to guiding the implementation of the EOSC.

### EOSC Declaration

RECOGNISING the challenges of data driven research in pursuing excellent science;

GRANTING that the vision of European Open Science is that of a research data common, widely inclusive of all disciplines and Member States, sustainable in the long-term;

CONFIRMING that the implementation of the EOSC is a process, not a project, by its nature iterative and based on constant learning and mutual alignment;

UPHOLDING that the EOSC Summit marked the beginning and not the end of this process, one based on continuous engagement with scientific stakeholders, the signatories;

ENDORSE the following intents and will actively support their implementation in their respective capacities:

### Data culture and FAIR data

- [Data culture] European science must be grounded in a common culture of data stewardship, so that research data is recognised as a significant output of research and is appropriately curated throughout and after the period conducting the research. Only a considerable cultural change will enable long-term reuse for science and for innovation of data created by research activities: no disciplines, institutions or countries must be left behind.
- [Open access by-default] All researchers in Europe must enjoy access to an open-by-default, efficient and cross-disciplinary research data environment supported by FAIR data principles. Open access must be the default setting for all results of publicly funded research in Europe, allowing for proportionate limitations only in duly justified cases of personal data protection, confidentiality, IPR concerns, national security or similar (e.g. ‘as open as possible and as closed as necessary’).
- [Skills] The necessary skills and education in research data management, data stewardship and data science should be provided throughout the EU as part of higher education, the training system and on-the-job best practice in the industry. University



associations, research organisations, research libraries and other educational brokers play an important role but they need substantial support from the European Commission and the Member States.

- [Data stewardship] Researchers need the support of adequately trained data stewards. The European Commission and Member States should invest in the education of data stewards via career programmes delivered by universities, research institutions and other trans-European agents.
- [Rewards and incentives] Rewarding research data sharing is essential. Researchers who make research data open and FAIR for reuse and/or reuse and reproduce data should be rewarded, both in their career assessment and in the evaluation of projects (initial funding, review of performance and impact). This should go hand in hand with other career policies in universities and research institutions (appointments, promotions etc.).
- [FAIR principles] Implementation of the FAIR principles must be pragmatic and technology-neutral, encompassing all four dimensions: findability, accessibility, interoperability and reusability. FAIR principles are neither standards nor practices. The disciplinary sectors must develop their specific notions of FAIR data in a coordinated fashion and determine the desired level of FAIR-ness. FAIR principles should apply not only to research data but also to data-related algorithms, tools, workflows, protocols, services and other kinds of digital research objects.
- [Standards] The EOSC must be underpinned by minimal and rigorous global standards for open research data, as well as standards for EOSC based services for collaboration through the EOSC (e.g. to facilitate inter-disciplinarity and avoid fragmentation). These standards (technical, semantic, legal and organisational) must combine long-term sustainability with optimal freedom of local implementation. They should be jointly defined by the research communities, taking into account existing instruments (e.g. EU Rolling Plan on ICT Standardisation). Cross-disciplinary agreements/protocols will lead to specific standards, inspired directly by relevant domain specific needs. Variations across scientific disciplines and their specific efforts of making research data open and FAIR should be respected.
- [FAIR Data governance] The design and implementation of FAIR principles must be built upon inclusive stakeholder participation (e.g. researchers from different scientific disciplines, EU Member States and the European Commission). Policy will go hand in hand with the implementation of technical and human resources, and a social infrastructure including education and training. To make FAIR data a reality, it is imperative to engage stakeholders and relevant multipliers, based on a solid stakeholder engagement strategy, on inter-institutional arrangements, well-established frameworks and decision-making flows. Data governance needs to be agreed upon

and the division of responsibilities be charted, ensuring transparency, representatively and accountability. European and national scientific research organisations, publishers and other actors must align their data related business processes, responsibilities and expectations to achieve commonly agreed goals.

- [Implementation & transition to FAIR] Implementation of FAIR principles requires careful prioritisation and orchestration. The FAIR Data Action Plan 2018-2020 is an important collaborative instrument for the embedding of FAIR principles in the first phase of the EOSC. The plan will not necessarily suggest any specific technology, standard or implementation solution. For an even transition of data from different levels of maturity to FAIR, existing activities to make data FAIR (e.g. GO-FAIR) must be complemented by new initiatives that embed FAIR principles in all the phases of data life cycle.
- [Research data repositories] Trusted research data repositories play a fundamental role in modern science. Scientist must be able to find, re-use, deposit and share data via trusted data repositories that implement FAIR data principles and that ensure long-term sustainability of research data across all disciplines. Data repositories must be easy to find and identify, and provide to users full transparency about their services.
- [Accreditation/certification] Scientists must be assured that the European and national scientific research infrastructures where they deposit/ access data conform to clear rules and criteria (e.g. certified) and that their data is FAIR compliant. An accreditation or certification mechanism must be set in place based on agreed processes and an accreditation or certification body must maintain an up-to-date and accessible catalogue of certified repositories. Experience from existing accreditation processes must be taken into account.
- [Data Management Plans] A key element of good data management is a Data Management Plan (DMP); the use of DMPs should become obligatory in all research projects generating or collecting publicly funded research data, based on online tools conforming to common methodologies. Funder and institutional requirements must be aligned and minimum conditions for DMPs must be defined. Researchers' host institutions have a responsibility to oversee and complete the DMPs and hand them over to data repositories.
- [Technical implementation] While FAIR data must be implemented as part of good data governance at this highest possible level (e.g. certification, institutional implementation and support, as describe above), researchers also need handy tools to make data FAIR. These include:
  - [Citation system] A data citation system should be put in place to reward the provision of excellent open data. This will assist both the assessment of researchers and their projects, and help implementing the findability, accessibility, interoperability and

reusability of research data.

- [Common catalogues] There must be catalogues (e.g. for datasets, services, standards) based on machine readable metadata and identifiable by means of a common and persistent identification mechanism that will make research data findable via an ‘EOSC Portal’.
- [Semantic layer] Research data must be both syntactically and semantically understandable, allowing meaningful data exchange and reuse among scientific disciplines and countries.
- [FAIR tools and services] Easy access must be available to a common set of FAIR tools and services, to guide the curation of FAIR data for re-use and to assess FAIR compliance.
- [Data expert organisations] The Research Data Alliance, CODATA, DDI Alliance and other organisations active in the research communities must be used as forums to reach consensus on practical implementation of FAIR data principles at European and global level.
- [Legal aspects] It is essential for the success of EOSC to clarify and address the legal uncertainty of Open Access to research data, as well as the correct legal implementation of the FAIR principles. Legal barriers to access and reusability of research data must be identified and overcome and the underpinning legal framework must be made simpler and more coherent. Conversely, issues of ownership must be addressed, particularly where institutions have created services and resources. All these measures should allow easier integration of research data across different legal frameworks, policy implementation plans and strategies.

#### Research data services and architecture

- [EOSC architecture] The EOSC will be developed as a data infrastructure common serving the needs of scientists. It should provide both common functions and localised services delegated to community level. Indeed, the EOSC will federate existing resources across national data centres, European e-infrastructures and research infrastructures; service provision will be based on local-to central subsidiarity (e.g. national and disciplinary nodes connected to nodes of pan-European level); it will top-up mature capacity through the acquisition of resources at pan-European level by EOSC operators, to serve a wider number of researchers in Europe. Users should contribute to define the main common functionalities needed by their own community. A continuous dialogue to build trust and agreements among funders, users and service providers is necessary for sustainability.
- [Implementation] Resources, components and initiatives of pan-European relevance will be federated on the basis of objective criteria, agreed by stakeholder-driven

governance, such as organisational readiness and technical capacity to deliver EOSC main functionalities: provision of core common services, certification activities, joint-procurement initiatives, definition of minimum quality standards of service (based on clear Service Level Agreements SLAs), identity provisioning and management, common cataloguing data and computing/analytic services and tools.

- [Legacy] The EOSC should incentivise the re-use of existing building blocks, state-of-the-art services and solutions delivered by past and ongoing projects, local, national and European, as opposed to subsidizing actions aiming at reinventing the wheel. It should facilitate learning from the past, adopting best practices, tailoring scientific community needs through live use cases and leveraging the network effect.
- [User needs] Users should see the EOSC as a one-stop-shop to find, access, and use research data and services from multiple disciplines and platforms. Services and functionalities shall be user driven and determined by clear use cases. Intermediary users and other brokers of end-users' demand-IT departments, umbrella associations, community networks-should assist data scientists and ICT specialists in the identification of key requirements for EOSC services.
- [Service provision] Research Data Infrastructures, e-infrastructures and commercial operators will develop and provide services based on user needs, and discontinue provision when not justified by the level of adoption. Services will be offered at highest Technology Readiness Levels (TRLs) and kept future-proof based on a cutting-edge cloud based environment. In order to avoid lock-in by individual service providers, the EOSC should foster fair competition of public, PPP and private providers on clear value propositions of highly professional services.
- [Service deployment] The EOSC shall support different deployment models (e.g. Infrastructure as a Service, Platform as a Service, Software as a Service), to meet the needs of communities at different levels of maturity in the provision and use of research data service. The EOSC shall support the whole research lifecycle by strong development at platform level that facilitate the provision of a wide set of software, infrastructure, protocols, methods, incentives, training, services. Software sustainability should be treated on an equal footing as data stewardship.
- [Thematic areas] The EOSC shall promote the co-ordination and progressive federation of open data infrastructures developed in specific thematic areas (e.g. health, environment, food, marine, social sciences, transport). The EOSC will implement a common reference scheme to ensure FAIR data uptake and compliance by national and European data providers in all disciplines.
- [Research infrastructures] The role of ESFRI and EIROFORUM research infrastructures and organisations in the EOSC will be enhanced, Member States and the European Commission made significant investment; research infrastructures

should be ‘the steward of the community of standards’ and provide scientists with a ramp-up for the utilisation of the EOSC.

- [EU-added value and coordination] The EOSC must implement policy hand in hand with technology. Condition of national and European measures is required to link the initiative to national strategies, to maximise the added value of inter-disciplinarily by making data FAIR, and to preventing duplication of efforts and investments. Over time, coordination will provide European added value by minimizing overlap and reducing fragmentation of infrastructures and services, helping long term sustainability.
- [High Performance Computing and the EOSC] European commitment to HPC is clearly demonstrated by the signature of the Europe Declaration by twelve Member States[Belgium, Bulgaria, Croatia, France, Greece, Germany, Italy, Luxembourg, Netherlands, Portugal, Slovenia, Spain] and one Associated State[Switzerland] since March 23, 2017. The Member States agreed to work together and with the European Commission in the context of a multi-government agreement called Europe for acquiring and deploying by 2022/2023 a pan-European integrated exascale supercomputing infrastructure that will support data-intensive advanced applications and services. It is a response to the surging demand from scientists, industry and the public sector for access to leading-edge computing capacity to cope with vast amounts of data produced in almost all scientific and engineering domains. This supercomputing and data infrastructure could support the European Open Science Cloud by providing data access and advanced computing and data management services. The EC plans to adopt in January 2018 a proposal for the establishment of a legal instrument (the Europe Joint Undertaking) that provides a procurement framework for the exascale supercomputing and data infrastructure, and supports the development of a full European HPC ecosystem. (\*) Belgium, Bulgaria, Croatia, France, Greece, Germany, Italy, Luxembourg, Netherlands, Portugal, Slovenia, Spain (\*\*) Switzerland.
- [Innovation] The EOSC should create a level playing field for businesses and innovative SMEs to develop, and co-develop with publicly funded institutions, added-value services for researchers. Funding should support the migration of cutting-edge solutions to the EOSC, increasing European added value by fostering innovation.

### Governance and funding

- [Governance model] A long-term, sustainable research infrastructure in Europe requires a strong and flexible governance model based on trust and increasing mutuality. As interdisciplinarity is one of the main objectives of the EOSC, the governance model should be based on representatively, proportionality, accountability,



inclusiveness and transparency.

- [Governance framework] The EOSC governance framework will be co-designed, stakeholder driven and composed of three main layers: 1) institutional, including EU Member States and European Commission 2) operational, including an executive board and relevant working committees (e.g. thematic and functional) and 3) advisory, including a stakeholder forum.
- [Executive board] An executive board will coordinate the efforts of stakeholders endorsing the EOSC Declaration, with the broad mandate to reach practical agreements for the implementation of an EOSC Roadmap by 2020. The board will have an advisory role and an implementing role of decisions concerning the programming, financing and towards the setting up of a long-term governance and business model for the EOSC. It will make best use of the outcomes of past and current projects (e.g. EOSC pilot, infratentorial and EOSChub) and independent expert advice and studies.
- [Coordination structure] A coordination structure, funded by Horizon 2020, will help the executive board to manage the implementation, according to agreed rules and methods of stakeholder participation. The structure and its participating entities should be accountable for the responsibilities assumed, based on an objective assessment of their level of readiness in delivering the EOSC main functionalities.
- [Long-term sustainability] Research Funders will use existing and future resources strategically, to ensure long-term sustainability of open research data and research infrastructures, facilitating inter-disciplinarily.
- [Funding] Over time, a co-funding mechanism mixing different revenue streams for the EOSC will be set up, to increase the accountability of the governance, building trust, sharing resources and building long-term capacity for European research data. Early implementation of the EOSC will pilot innovative business models and support an integrated data and service platform for European research.
- [Global aspects] The EOSC will be European and open to the world, reaching out over time to relevant global research partners. It will increase the global value of open research data and support stakeholder engagement, including researchers and citizens. It will gradually widen the initiative to federated network of infrastructures and nodes from global research partners. The EOSC Stakeholder Forum will have an important role in this sense.

## 第二篇

# 面向国家重大需求篇





## 国家科技管理信息系统建设与应用

胡少华 王卓昊 宋学鹏 陈 静 门浩崧 王 东 李 青 张 京

(中华人民共和国科学技术部信息中心)

### 摘 要

国家科技管理信息系统(NSTIS)是支撑国家级科技计划统一管理、统筹实施和全过程服务的综合性技术平台。本文针对科技体制改革精神和改革措施,在深入分析服务需求、应用需求和关键技术环节的基础上,提出面向公众、部门联席会议、专业机构和监督评估的国家科技管理信息系统需求框架,研究提出适应于多部门、多层级协同的分布式多节点业务体系。基于四层系统整体框架,构建基础服务、平台服务、资源服务、业务支撑等核心资源和核心功能,提出相应关键技术和解决方案。最后分析总结国家科技管理信息系统建设成效,并对未来研究方向进行展望。

### 关键词

科技计划改革;科技管理平台;科研项目管理;应用集成;数据融合

### Abstract

The National Science and Technology Information System (NSTIS) is a comprehensive information system supporting the unified management and implementation of national science and technology plans and providing overall process services for them. With the principles and measures of scientific and technical system reform and based on in-depth analysis of service needs, application requirements and key technology, we present a demand framework of NSTIS towards the public, departmental joint conferences, professional institutes, and supervision and evaluation institutions, and propose a distributed and multi-node business system which is suitable for multi-department and multi-level coordination. Moreover, we establish the core resources and functions, such as basic service, platform service, resource service, business support, and propose relevant key technologies and corresponding solutions based on the four-layer system architecture. Finally, we analyze and summarize the achievements of the establishment of NSTIS, and provide an outlook on future lines of research.

### Keywords

Reform of Science and Technology Plans; Science and Technology Management Platform; Management of Scientific Research Projects; Application Integration; Data Fusion

## 1 建设背景

近年来,为深入推动创新驱动发展战略,科技领域推出了一系列深化科技体制改革的举措。2014年12月,国务院发布《关于改进加强中央财政科研项目和资金管理的若干意见》(国发〔2014〕11号)<sup>[1]</sup>和《关于深化中央财政科技计划(专项、基金等)管

理改革方案》(国发〔2014〕64号)<sup>[2]</sup>,要求建设完善国家科技管理信息系统,改革后的中央财政五类科技计划专项基金的实施过程全部纳入统一的信息系统,对需求征集、指南发布、项目申报、立项和预算安排、监督检查、验收结果等进行全过程信息管理,并主动向社会公开非涉密信息,接受社会监督,利用信息系统来推进科技资源的统筹配置,推进公开公正。

通过多年的信息化建设,我国科技领域已形成了分别支撑不同科技计划、科技基金的多个国家级科技管理服务平台。

2006年,科技部信息中心建成统一的国家级科研项目网络申报服务平台“国家科技计划申报中心”和“预算申报管理中心”<sup>[3]</sup>,实现了国家高技术研究发展计划(863计划)、国家重点基础研究发展计划(973计划)、国家重大科学研究计划、国家科技支撑计划、国家星火计划、国家火炬计划、国际科技合作计划等多类科技计划专项的统一网络申报和管理服务,通过构建公共服务框架,解决网络申报渠道过多、技术体系混杂的问题。2014年,国家科技管理信息系统一期系统在科技部全面上线运行,基本覆盖了改革前原有国家级科技计划体系,形成了统一的计划管理、业务协同和数据资源服务平台,打通了不同单位、不同层级间的管理端屏障,实现了从申报、立项、组织实施到后期管理、成果服务的统筹整合。

针对国家自然科学基金,国家自然科学基金委员会建设了科学基金网络信息系统(ISIS),ISIS系统面向我国自然科学基金各类项目申报受理和管理业务,支撑从申报、受理到评审等重要环节。

面向科研项目、科研经费等资源管理,中国科学院建设了科研资源规划项目系统(ARP)。ARP系统通过统一的平台和资源中心,打通了中国科学院、所两层信息流和业务屏障,实现了在全院范围内科研业务、科技人员、科技经费等信息资源的统筹管理,推进了科学院系统科研过程“公开、公正、透明”管理。

由于这些系统建设目的、服务范围、技术架构和管理主体存在一定差异,系统间并未实现互联互通、资源统筹。面向新的国家级科技计划管理改革需求,这些系统难以直接服务于国家科技管理平台,特别是难以直接服务于跨部门的科技计划部门联席会议、专业管理机构和各级各类组织实施部门、科研单位的业务需求。依据科技部有关落实改革措施的要求,2014年起,科技部信息中心等单位启动了国家科技管理信息系统建设工程,国家科技管理信息系统建设涉及面广、影响重大,是推动科技体制改革、加强科技资源统筹、提高管理决策科学性的一项十分迫切而又极其重要的工作。

## 2 需求分析

国家科技管理信息系统是跨多部门、多地区运行的综合性信息服务系统和信息技术应用体系,本文根据“一体化、全流程、高效用、智能化”的设计思路,从任务长期性、管理复杂性、主体多样性、人员动态性等方面分析国家科技信息管理系统的需求和挑战。



## 2.1 服务需求

国家科技管理信息系统的服务需求主要来自《关于深化中央财政科技计划（专项、基金等）管理改革方案》（国发〔2014〕64号）<sup>[2]</sup>以及后续相关政策文件和管理办法。国家科技管理信息系统是中央财政科技计划（专项、基金）的主要统筹管理组织形式，主要由“一个制度、三根支柱、一个系统”组成，一个制度即部际联席会议制度，三根支柱分别是专业机构、战略咨询与综合评审委员会、监督评估体系，一个系统即国家科技管理信息系统，实现对中央级科技计划的全过程管理。一是面向广大科研人员，提供统一的申报受理、信息查询、组织实施、业务咨询等服务；二是面向部门联席会议，提供综合业务和决策信息服务；三是面向专业机构，服务专业化过程管理；四是服务统一的评估和监管机制。

## 2.2 应用需求

### 1. 统一的用户体系和可扩展的授权管理

用户体系须满足多类、多级业务要求与约束。国家科技管理信息系统的用户包括国务院科改小组、科技计划管理部际联席会（联席会）、战略咨询与综合评审委员会（咨评会）、各级科技行政管理单位、各类专业管理机构、评审评估机构、评审咨询专家、科研院所、科研企业、科研人员和社会公众等，用户种类复杂、数量庞大，突发性增长可能性大。

访问控制元素多种多样。面向各类用户提供差异化的业务支撑和信息服务，主要包括基本权责、功能角色、数据范围、受控系统（申报系统、年报系统等）和相关细粒度功能（受理、形式审查等）。

### 2. 统一的门户系统和认证管理

须支撑多系统用户互认、简便快捷登录和互访。国家科技管理信息系统涉及公共服务模块、综合管理模块、项目管理模块、专家服务模块、评审服务模块等，由多个独立的业务系统及其支撑环境组成，分别承载综合管理信息、申报数据、业务管理数据、技术管理记录等。须全面设计用户体系及访问控制系统，解决统一身份认证和单点登录等问题。

同时，用户体系设计须考虑具有较好的维护特性和可扩展性。例如，快速适应“三证合一”“五证合一”的社会管理改革措施，应对企业信息变更与维护需求，适应在项目管理中维护企业信息变更所引起的一致性保障要求。

### 3. 面向管理单位的综合统筹与项目管理服务

汇集多源数据支撑综合统筹管理，支撑科技计划各类专项全流程管理。汇集、整理、更新由多个业务系统、部门单位维护的科技计划信息、科技项目数据、科技经费数据、科研服务数据，面向联席会议、综合咨询评议委员会提供数据统计、信息支撑和对比评价，支撑综合平衡与业务协作。

面向有关管理单位提供科研项目查询、信息汇总等服务，支撑有关实施方案编制、指南编制、专家遴选与甄别等工作；面向专业机构提供计划信息、专项数据、指南编制、项目管理等业务服务。多维度保障跨部门、跨地区的综合管理业务，支撑宏观科技管理、计划专项布局、资金管理、评估评价等。

#### 4. 面向社会公众的“一站式”科技计划综合申报服务

提供全过程“一站式”综合服务，服务各类科研人员、科研单位、评审专家、项目专业机构、项目评估机构、行业部门科技管理单位。一方面，提供项目公示、项目申报、信息反馈、咨询服务等；另一方面，支撑计划指南发布、申报受理、组织实施。

向社会公众提供在线服务时，应充分考虑大量用户集中访问带来的访问压力，应结合分布式处理思想，保障公众服务快速、稳定、高效、安全。由于传统科技信息服务烦琐的业务流程和复杂的业务数据，系统用户的使用体验有待提高，须进一步提升智能化、便捷化科技信息服务水平，为用户提供“定向服务”“精准服务”。

### 3 整体框架

#### 3.1 业务体系

科技信息管理涉及多个管理部门、地方科技管理单位，承载五类科技计划（专项、基金），面向联席会议、战略咨询、管理部门、专业机构、科研机构、科研人员、科技专家、社会公众提供统一、全面的科技计划项目信息管理服务，科技信息管理的业务体系如图 1 所示。

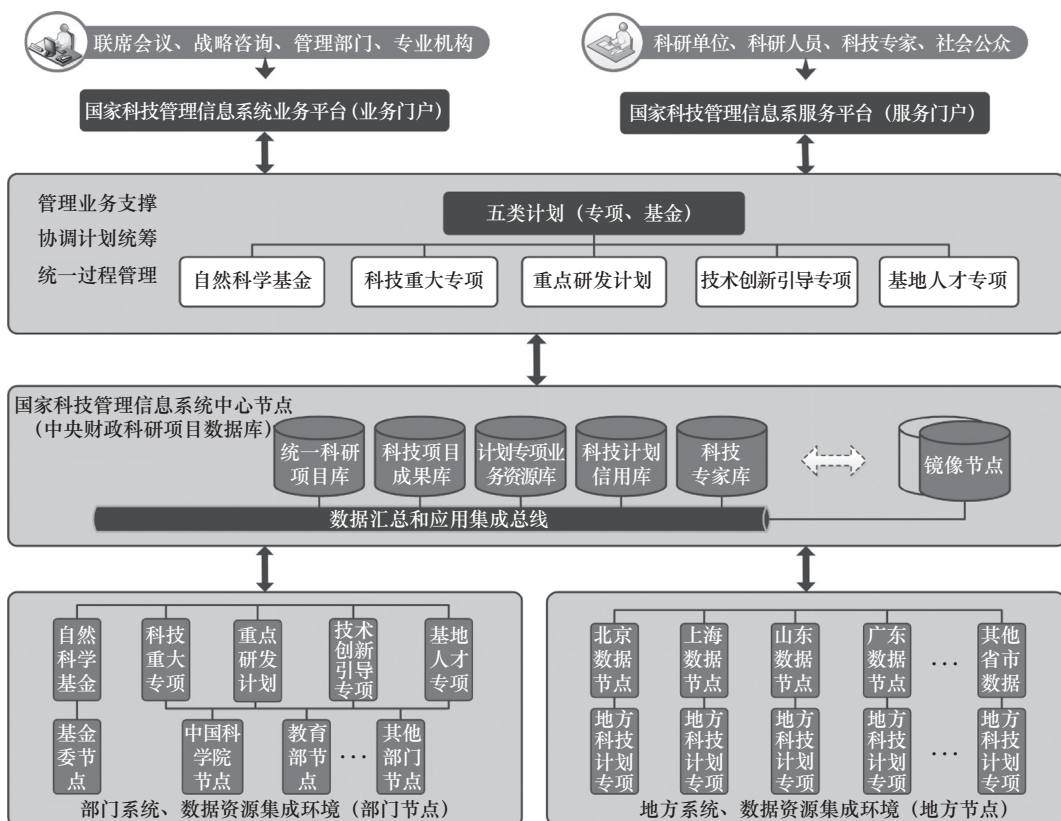


图 1 科技信息管理的业务体系

业务体系顶层是面向各类用户的各类业务服务，基于五类科技计划数据资源和业务流程，通过国家科技管理信息系统业务平台和服务平台，为各类用户提供管理业务支撑服务、协调计划统筹服务、统一过程管理服务。

业务体系的核心是国家科技管理信息系统中心节点，运行于科技部相关网络环境，承载国家科技管理信息系统的公共服务平台、项目管理功能模块、技术管理功能模块、重要应用系统、中央财政科研项目库和有关数据资源环境，利用应用集成总线集成各类应用系统。中心节点以中央财政科研项目数据库为数据资源，覆盖科技部、财政部、教育部、中国科学院、自然科学基金委等中央民口各部门科技计划（专项、基金）项目数据。中央财政科研项目数据库面向各级科技行政管理单位、科研院所和科研人员提供信息服务，涉及科研项目、科研经费以及有关科研活动过程信息，主要提供宏观统筹和综合协调业务服务、科研业务管理服务和公共科技服务。

业务体系的底层是科技管理数据资源，由相关部门、地方科技管理单位节点组成，运行于相关单位的网络环境，承载相关科技计划（专项、基金）的实施过程管理模块、科技计划（专项、基金）数据资源以及有关应用系统。业务体系的中心节点与部门节点、地方节点之间通过数据汇总总线相互连接，实现数据资源的互联互通。

按照“谁产生、谁审核，谁发布、谁负责”的原则，各节点管理部门负责本部门科研项目数据及科技成果数据等信息资源目录的编目、注册、业务审核、发布工作，负责将本部门对外共享的科技管理信息资源在本级科技管理信息系统上进行注册和更新。各部门负责各自的科技管理信息系统的系统运行环境的硬件及系统软件的部署，以及对外服务应用系统的部署、管理和数据更新维护工作，并通过统一标准的接口与中心节点实现互联互通。

### 3.2 系统架构

国家科技管理信息系统整体架构划分为四层，自下而上分别是基础设施层、平台服务层、业务应用层和访问渠道层，用户从访问渠道层进入系统完成各类科技计划业务操作。各层的系统模块在开发时按照安全防护要求进行设计，在后期运行维护过程中遵循运行管理要求进行服务保障。国家科技管理信息系统架构如图 2 所示。

基础设施层为系统架构提供硬件环境支撑，在服务器、存储设备、网络的基础上，还包括虚拟化软硬件构成的云环境管理、资源管理、任务管理模块。

平台服务层包括服务集成、集成共享、数据处理、应用构件与运行支撑模块。服务集成模块通过服务总线，集成系统架构中的不同分类的服务，连接相关的服务仓库，实现各类服务的协同工作，为整体服务的运行监控提供平台与接口。集成共享模块为各类业务流程管理、应用数据交换、用户权限管理和应用集成审计提供统一的接口和标准，是应用、服务、数据、用户集成的基础模块。数据处理模块是系统架构的数据中心，为各个应用系统之间的数据采集、数据交互、数据存储、数据分析和数据管理提供数据结构、接口规范、传输格式、通信模式等。应用构件与运行支撑模块为各类应用系统的开发、测试、部署、运行维护支撑提供必要的服务接口和管理平台。

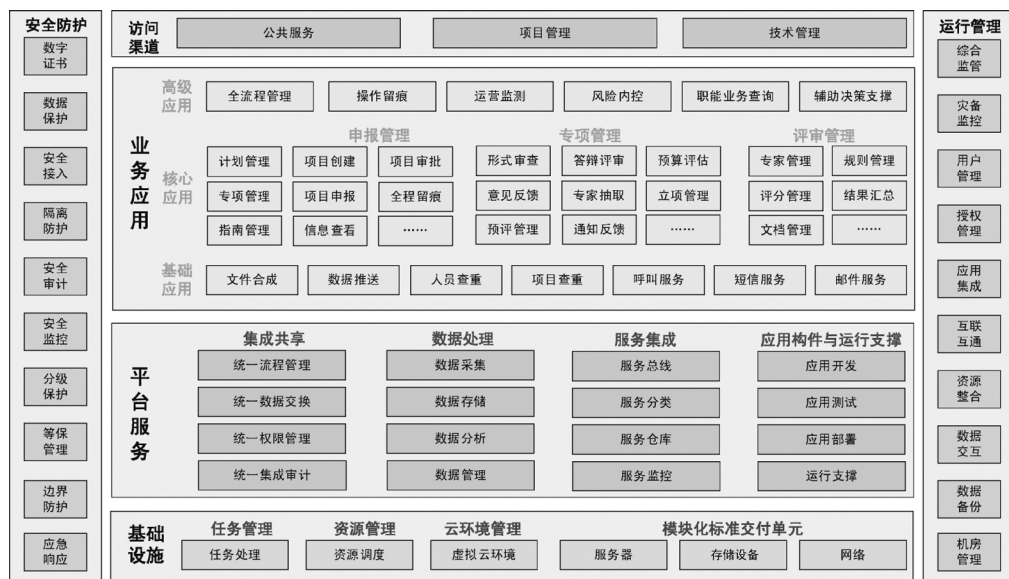


图2 国家科技管理信息系统架构

业务应用层汇聚各类业务应用系统，由于应用系统之间存在一定的层级与调用关系，所以将业务应用层划分为高级应用、核心应用和基础应用三个子层次。高级应用子层承载系统架构的关键功能，包括全流程管理、操作留痕、运营监测、风险内控、职能业务查询、辅助决策支撑。核心应用子层维护核心业务应用系统，按用户类别和业务功能分为面向科研用户的科技计划项目申报管理模块、面向科技管理人员的专项管理模块和面向科技专家的评审管理模块等。基础应用子层为核心应用子层提供基础应用服务，主要包括文件合成、数据推送、人员查重、项目查重、呼叫服务、短信服务、邮件服务等。

访问渠道层是国家科技管理信息系统面向用户的门户，包括面向科研人员、科研单位、地方科技管理单位的公共服务门户，面向科技管理单位、专业机构、预算评估单位的项目管理门户，面向技术管理单位的技术管理门户。

安全防护与运行管理模块为整体架构中各层的协同工作、安全稳定、服务共享、数据互通等提供支撑服务，保障整体架构内各应用模块高效、稳定地运行。

### 3.3 核心功能

#### 1. 用户授权管理体系

国家科技管理信息系统面向国务院科改小组、科技计划管理部际联席会（联席会）、战略咨询与综合评审委员会（咨评会）、各级科技行政管理单位、各类专业管理机构、评审评估机构、评审咨询专家、科研院所、科研人员和社会公众等各类用户提供业务支撑和信息服务，每类用户在系统中扮演不同的角色，可访问的系统和功能不尽相同，通过建立规范的用户授权体系，管理用户可以使用的模块，限制用户能访问的数据，控制用户对数据允许的操作，记录用户的行为，从而确保系统及数据的安全，保障系统的按



需有序使用。

基于角色访问控制（RBAC）技术适用性强，应用粒度细，构建策略灵活，适合用在国家科技管理信息系统中构建规范的授权体系模型。在 RBAC 中，根据权限的复杂程度，分为 RBAC0、RBAC1、RBAC2、RBAC3。其中，RBAC0 是基础，RBAC1、RBAC2、RBAC3 分别在 RBAC0 基础上增加了继承、限制等扩展，RBAC3 则是 RBAC1 和 RBAC2 的结合。国家科技管理信息系统中涉及的用户包括多单位、多部门、多级别等各类用户，从功能角度又分为申报、评审、推荐、审核、管理等多类职责，访问控制需求比较复杂，在系统建设中选取 RBAC3 作为国家科技管理信息系统的权限管理模型。

## 2. 统一单点登录与认证服务

国家科技管理信息系统涉及各类宏观决策信息、科技计划专项信息、综合统筹管理业务、科技计划专项管理业务、科技项目管理业务以及科技信用、科技成果、绩效评价等过程信息，由多个独立的业务系统及其支撑环境组成。传统用户分散管理的认证机制已不能适应发展的需要，大量的口令密码给系统管理带来了困难，也给用户带来了不小的麻烦。统一身份认证和单点登录是解决这一问题的有效途径。

通过建立统一的认证中心可以实现用户的统一管理，以及面向多个应用系统提供统一身份认证服务，用户只需认证通过后，就可以在多系统之间实现无缝访问与交互，无须重复登录。用户信息在认证中心进行统一管理，应用系统之间只需要传输认证票据，在保障信息安全的同时，也实现了认证信息与业务数据的分离。

OAuth2.0 是为用户资源的授权定义了一个安全、开放及简单的标准，第三方系统无须知道用户的账号及密码，就可以获取到用户的授权信息。采用 OAuth2.0，能够实现各信息系统的跨域访问。为了应对大量用户并发访问的压力，国家科技管理信息系统中采用了基于 Nginx 的分布式统一身份认证机制，利用 OAuth2.0 认证服务器解耦用户认证信息与认证节点的绑定，通过多节点任务调度提高系统响应时间、应对高并发用户，从而保证认证系统的稳定运行。

## 3. 综合业务管理

国家科技管理信息系统依托统一的用户管理授权访问体系、统一的应用集成和服务接口、统一的数据存储和交互平台，支撑各类科技计划体系下的计划统筹、专项管理、项目组织、过程管理，提供受理管理、数据浏览、形式审查、信息反馈、评审管理、网络评审、答辩评审、专家抽取、立项确认、过程管理、验收管理等技术服务和操作保障，实现严格的应用系统（模块）集成、访问控制以及操作痕迹记录跟踪等功能，有效支撑各类业务应用和综合业务管理。

国家科技管理信息系统以保障科技计划数据管理和业务服务为重点，在保障数据安全存储、合理分类管理的基础上，为系统业务提供有效的数据支撑，同时对于公共的业务服务，抽取转换为统一数据交换、数据计算服务，形成从数据到服务到业务的三位一体化的系统构建模型。

国家科技管理信息系统基于多层软件体系结构和面向服务的 SOA 软件架构，广泛使用服务组件和模块化技术以及高度灵活可配置技术，基于消息服务的应用集成技术，



通过建立 SOA 架构,实现各个子系统的信息服务,以松耦合原则实现共享,并可将各种服务快速整合,开发出组合式应用,达到“整合即开发”的目的,从而满足了对于国家科技管理信息系统综合业务管理灵活变化、易于扩展的需要,实现了对需求的快速响应。

#### 4. 面向公众的统一服务

国家科技管理信息系统公共服务平台面向科研院所、科研人员、社会公众及全部参与科技项目申报的管理实体,实现面向申报受理的综合服务、业务环境和技术服务,提供统一的服务门户、用户备案认证、信息公开公示、指南发布、网络项目申报、网络业务受理、数据资源集成、交互信息协同等功能,可有效支撑各类公共服务应用系统(模块)的业务协同、数据交换、稳定运行。

为保证统一的、一站式科技计划综合申报服务,系统业务集成是系统集成的重点目标之一,公共服务平台针对被集成的应用系统展现的逻辑关系完成集成工作,为最终用户提供一个与信息系统进行交互的统一视图和访问入口,使用户能够与人、内容、应用和流程进行个性化的、安全的、单点式登录和互动交流。系统建设采用集中的页面展现形式,实现用户界面集成,统一页面,实现整体业务流程的切换和跳转。

应用安全保障方面,建立覆盖互联网层、Web 层、应用层和数据层 4 个层次的立体式安全防护体系。互联网层依据国家科技管理信息系统用户授权管理体系,建立用户识别和认证机制,以及加强数据传输通道的安全防护;Web 层针对常见攻击类型建立多级防火墙;应用层建立面向科技计划项目申报受理等业务流程,用户授权、服务授权、访问审计的权限控制体系;数据层保证各类项目、业务、流程数据加密、备份保护(高可用),以及授权终端访问。

### 3.4 关键技术

#### 1. 应用集成与服务互联

国家科技管理信息系统面临应用系统架构各异、数据资源结构各异、支撑服务业务各异等问题,本文提出一种应用集成和服务互联的方法,从服务集成和数据集成两个方面入手,实现科技计划多业务集成。在数据集成的基础上,构建服务集成层,实现数据汇交、数据查询、统计报表、数据分析等相关服务,最终实现多业务集成的目标。

服务集成方面,各类系统服务协同工作支撑科技计划项目申报受理、立项管理、过程管理和验收管理等业务操作,针对这种复杂的业务模式的集成要求,需要首先建立统一的服务模型,将用户服务、项目服务、经费服务、审批服务、专家服务、科技文献服务、计划数据服务、科学仪器及科技资源服务等多种类型的资源进行面向服务的封装,设计统一的门户系统、服务总线和服务集成规范,通过服务总线连接门户系统与各类应用系统服务,对科技计划的各类业务与数据资源进行加工、整合,并借助底层服务总线组件对服务进行注册、分类、索引、维护,实现服务的路由、调用和交换,提升现有系统的利用价值,从而为减少重复建设、提高建设效率、降低建设难度提供有力支撑。最终实现对我国的科研管理制度的完善,为提升我国的科研管理水平和科研经费的利用效率打下良好的软件平台服务基础。

数据集成方面,国家科技管理数据资源存在于大量已建系统,涉及科技计划管理方面面的核心业务。从技术角度来看,实现多业务集成的另一个主要内容是异构数据的集成,通常数据集成的方法可分为联邦数据库系统、数据交换系统和数据仓库。联邦数据库系统(Federated Database System, FDBS)是由参与联邦的半自治的数据库系统组成,联邦中的所有数据库都添加了彼此访问的接口(如网关),将每个数据库模式分别和其他所有数据库模式进行映射。数据交换系统提供统一的数据共享服务和数据交换服务,是“统一应用平台”的最基本的组成部分,其采用已有的消息中间件、应用集成中间件和J2EE应用服务器,来提供基本的服务功能,包括统一的数据和服务表示方式及数据描述工具、基于Web Services的应用系统连接工具、标准的数据处理功能、标准的数据传输组件等。数据仓库集成异构数据库的策略是使用ETL工具定期将来自多个异构数据库的数据,按照一个集中、统一的视图要求,进行提取、清洗、转换等操作,以符合数据仓库的模式,存储到数据仓库中,对于使用者来说就像在使用一个普通的数据库一样。在技术方案上综合采用上述数据集成方法,建立统一的数据模型和数据规范,结合科技管理的具体业务情况,整合分散在不同科技计划信息系统中的项目数据、经费数据等数据资源。

## 2. 数据体系与管理

国家科技管理信息系统数据资源包括科研项目数据、业务管理数据、科研业务共性数据等,其中主要数据类型及相互关系构成数据资源体系结构,如图3所示。

构建结构化、半结构化、非结构化数据资源库,根据国家科技管理信息系统各类数据资源的数据结构,科学规划结构化、半结构化、非结构化数据建库方法,制定建库策略。按照三类资源形态的结构特点和存储规模,分类研究制定不同数据资源汇聚整合的技术手段与基本策略,确定每一类具体数据的存储结构和建库方式。设计统一的元数据描述规范,按照三类资源形态的结构特点,根据相关标准要求,进行规范化处理,构建统一元数据描述的数据资源规范目录。形成“大数据”存储管理机制,在传统集中式关系型数据库管理的基础上,拓展引进当前“大数据”主流技术,采取分级存储、分区管理、缓存优化等机制,支撑海量半结构化、非结构化数据的快速存储、读取、归档、备份需要。

利用分布式多维数据仓库建立科技管理要素关联模型,采用基于分布式多维数据仓库方案,进一步深化各类科技资源的深度整合,实现结构化数据、半结构化数据和非结构化数据的关联整合,深挖数据资源内在价值,促进深度应用。通过三种模型、两次关联的技术方法,设计数据仓库模型,实现各类数据资源的关联和集成调用。一是基本要素模型(星形结构),建立包括计划、专项、项目、课题、单位、人员、经费等要素在内的各类基础数据的集成关联;二是层次模型(树形结构),按照统一的分类层次划分,以预申请书、申请书、任务书、年度报告、科技报告、验收报告为核心,构建全面覆盖国家科技管理的全局信息层次模型;三是多核心关联模型(网状结构),以项目数据、渠道审核、形式审查、答辩评审、专家评分、成果产出、文档文件、操作留痕、用户数据、角色权限等为核心,建立要素间信息的集成关联,以此实现数据资源之间的全要素的闭环关联、集成应用,不断加强结构化与半结构化、非结构化数据资源的汇聚整合和逻辑集成、共享应用,实践探索科学、高效的科技管理数据仓库结构体系。

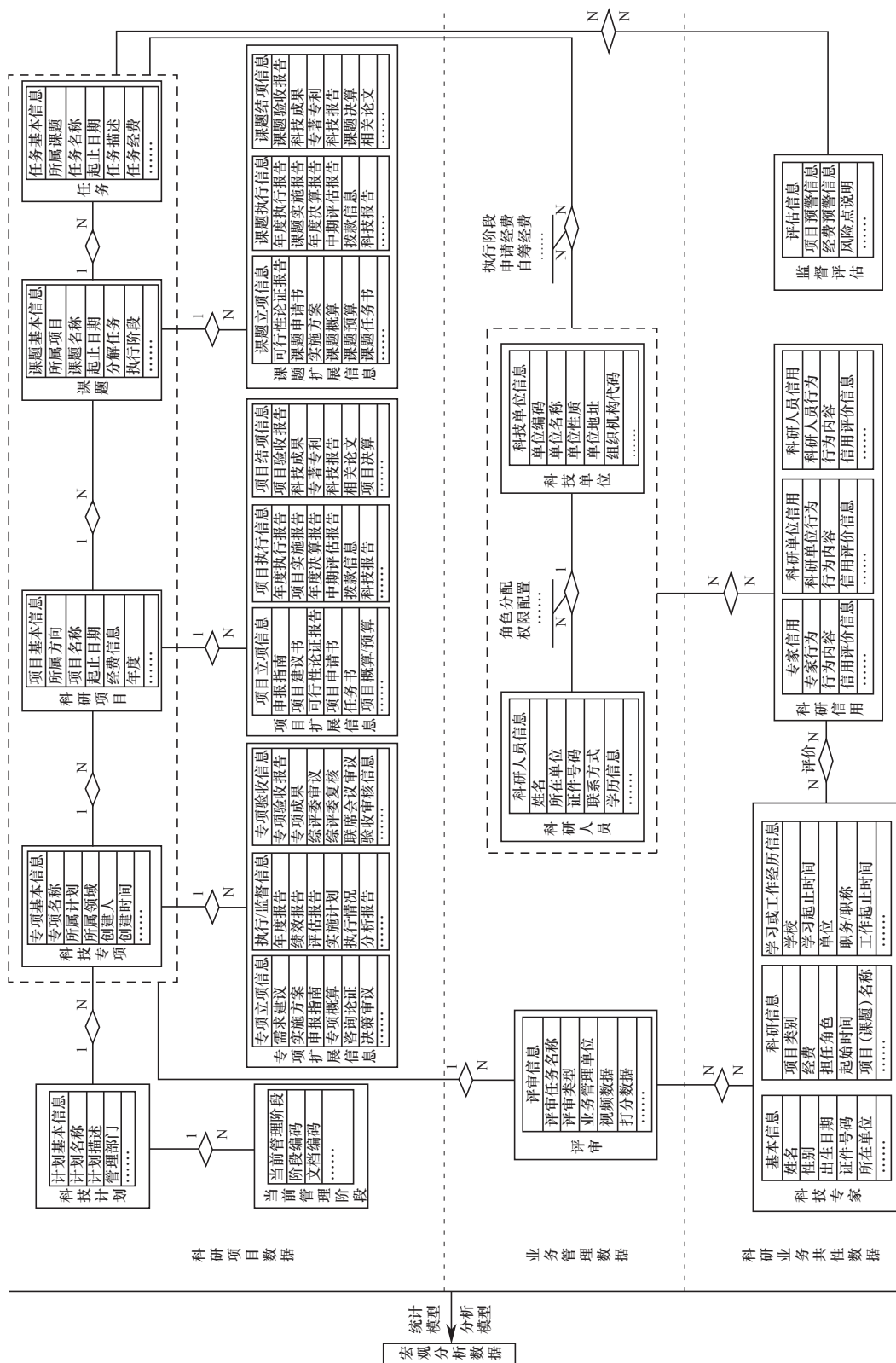


图 3 数据资源体系统结构

### 3. 科技云环境运行与维护

国家科技管理信息系统业务应用的运行一般需要依赖主机、存储、网络以及中间件、数据库、负载均衡器等运行环境。传统的应用部署方式需要人工进行安装、配置和部署，存在耗时长、易出错、资源缺乏共享利用等问题。

针对上述问题，在现有云计算基础设施管理技术的基础上，设计了基于事件驱动的应用运行支撑环境编排方法。首先标准化应用运行环境中的主机、存储、网络规格，以及中间件、数据库、负载均衡器镜像，然后通过梳理部署过程中的关键环节形成典型事件，将实施人员的经验固化成通用的自动化脚本，最后应用部署时可以定制化地将事件与脚本进行绑定，事件发生时触发执行对应的自动化脚本。例如，某个应用需要使用中间件和数据库，并且中间件需要访问数据库，因此可以在数据库服务启动完成后，触发执行脚本将数据库服务的 IP、端口等信息写入应用中间件，并启动应用中间件。通过本方法，每个应用部署时，都可以通过事件和脚本将运行环境中涉及的各个组件编排起来，最终实现完整应用环境的自动创建，提高应用环境的部署效率。

通过对承载业务系统的云资源进行实时监控，设计了基于负载压力的应用弹性伸缩方法。根据应用的负载压力，实现应用的弹性伸缩。在业务应用运行时，对负载相关的指标（CPU 利用率、内存利用率、请求并发数、平均响应时间等）进行监控，采集监控指标输入弹性伸缩算法进行综合计算，将计算结果与弹性伸缩策略中的临界值进行比较，判断是否需要触发弹性伸缩，然后借助 IaaS 自动实现应用节点的增加或减少，最后通过事件触发脚本，将增加或减少的应用节点对用户透明地融合到整个应用环境中。

### 4. 智能用户信息处理技术

利用大数据、机器学习等关键技术，以用户为核心，捕捉用户在国家科技管理信息系统中的各类操作、行为、偏好等，建立精准的用户画像，通过各个维度对用户的特征属性进行刻画，抽象出用户的信息全貌，能够有效支撑科技事件的监督监察评估，提升其准确性、有效性与时效性，为科技管理决策提供数据支持。

用户画像模型体系由两大部分组成：标签体系与相应的分析模型。标签是某一种用户特征的符号表示，每个标签规定了我们观察、描述、认识用户的某一角度，用户画像可以用标签的集合来表示，它是一个整体，各个维度不孤立，标签之间有联系。国家科技管理信息系统中建立的用户画像，可以从申报、评审、管理等多维度描述用户特征，例如用户的基础信息、申报信息、评审信息、立项信息等，对用户进行全方位立体化的刻画。

用户画像构建的方式包括三个方面：信息关联与抽提、画像建模与主题分析、画像表达。利用用户行为抽象、规则推演技术、机器学习算法等技术对用户标签进行分析与挖掘，从而在用户之间建立关系网络图谱并不断演进，能够有效支撑科技事件的监督监察评估，并为科技管理决策提供数据支持。

## 4 建设应用成效

根据总体改革部署，配合五类科技计划的具体改革进度要求，科学技术部聚焦重点



研发计划试点专项、重大专项以及部门互联互通需求，确保做好相关改革措施的信息化保障服务工作。目前主要工作进展情况及成效如下：

一是顺利支撑新设和原有科技计划体系运行管理。根据改革要求，构建了覆盖申报受理、立项管理、过程管理和验收管理的科技计划信息化保障体系，顺利支撑“十三五”新的科技计划体系的凝练启动、运行实施。同时，优化完善原“十二五”科技计划申报系统，支撑“十二五”期间的主体计划（973计划、863计划、支撑计划）、政策引导类计划管理与运行，保障原有计划业务稳定，保障新的科技计划体系平稳过渡。累计服务29类科技计划，支撑约4.5万项次项目（课题）管理。

二是建成科管系统公共服务平台。2015年9月30日，国家科技管理信息系统公共服务平台上线运行<sup>[4]</sup>，如图4所示，建设过程与管理改革同步设计、同步开发、同步应用。目前，公共服务平台已全面支撑国家重点研发计划、国家科技重大专项的全过程公开公示、统一网络申报、项目过程服务、业务查询及服务交互。



图4 国家科技管理信息系统公共服务平台



三是支撑科技计划各类专项全流程管理。全面服务国家科技计划部门联席会议、主管部门、行业单位管理单位和多家专业管理机构,通过线上、线下服务支撑国家重点研发计划、国家科技重大专项的申报受理、形式审查、意见反馈、专家抽取、项目评审、立项安排、任务签订等重要管理环节,支撑业务管理全程留痕、申诉反馈和管理回溯,实现全过程一体化管理的业务目标。

四是管理过程全程留痕,实现“可查询、可申诉、可追溯”。国家科技管理信息系统针对各类管理环节提供统一的过程记录功能,严格记录项目推荐、形式审查、网络评审、视频评审、专家抽取等环节的人员操作过程,支撑管理回溯、责任倒查。视频评审采用“答辩现场+答辩播讲+评审现场”的多角度现场实况录制模式,确保全部评审过程记录完整、数据完备,有效支撑管理复盘、申诉仲裁、信访调查和舆情处置。累计支撑视频评审近200次、约3万项次,先后服务专家约2.6万余人次。

## 5 总结与展望

建设国家科技管理信息系统是加强我国科技资源统筹、提高科研管理水平、增强创新支撑能力的重要管理举措及技术工程。国家科技管理信息系统一方面与各部门、各地区相关科技业务管理信息系统衔接,保证各类科技管理业务的相互衔接和业务协同,实现业务信息、科研项目数据的互联互通;另一方面承载各类跨部门宏观决策、综合管理和各类专项业务中的统筹管理功能,保障跨部门、跨地区的综合管理业务,形成统一的科技数据资源目录,实现宏观科技管理、计划专项布局、专项组织实施、资金管理、评估评价、成果转化等环节的统一规范管理。

在下一步工作中,国家科技管理信息系统将按照国务院、科技部的总体布局,做好顶层规划,保障重点建设,逐步推进系统优化与升级。

(1) 构建数据服务体系,实现高效能数据服务。结合国家科技管理信息系统建设与应用,推进各类数据资源的集成、管理与分析应用。

(2) 加强技术环境建设,实现便捷业务服务。不断调优技术环境、申报系统、业务系统、专家库等支撑平台建设,提高技术保障能力。

(3) 强化信息服务,完善科研支撑服务体系。构建一体化科技管理信息推送与交互服务体系,实现“让科研信息多跑路,让科研人员少跑腿”。

### 参考文献

- [1] [http://www.gov.cn/zhengce/content/2014-03/12/content\\_8711.htm](http://www.gov.cn/zhengce/content/2014-03/12/content_8711.htm).
- [2] [http://www.gov.cn/zhengce/content/2015-01/12/content\\_9383.htm](http://www.gov.cn/zhengce/content/2015-01/12/content_9383.htm).
- [3] <http://program.most.gov.cn>.
- [4] <http://service.most.gov.cn>.

## 作者简介



胡少华，科学技术部信息中心常务副主任，研究员。主要专业领域：复杂信息系统架构、数据集成与挖掘分析、知识管理与知识服务技术。近年来主持研发建设全国科技信息服务网、国家科技计划申报中心、国家科技成果信息服务平台、国家科技管理信息系统公共服务平台等。

## 中国科技云现状与展望

李俊<sup>1</sup> 李菁菁<sup>1</sup> 石珊珊<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院计算机网络信息中心; 2. 中国科学院大学)

### 摘要

中国科技云是中国科学院“十三五”信息化工作的一项重要内容,“中国科技云”建设工程将以“率先行动”计划和“智慧中国科学院”的需求为牵引,打造以科技工作者为中心,以资源统一调度和用户自服务为鲜明特色的信息化资源管理与服务云平台。本文总体介绍了中国科技云的发展思路和技术架构、目前取得的成果以及下一步发展方向。

### 关键词

云服务; 科研网络; 超级计算; 科学数据

### Abstract

The Chinese Science and Technology cloud is an important project in the Chinese Academy of Sciences' "13th Five-Year Plan" program of information, "Chinese Science and Technology Cloud" construction project will take "the first action" program plan and the "wisdom of the Chinese Academy of Sciences" demand as a traction, to build a resources management and service cloud platform, with science and technology workers as the center, and unified resource scheduling and user self-service as the distinctive characteristics. This paper gives a brief introduction of the Chinese Science and Technology Cloud including development, technical architecture, current achievements and future work.

### Keywords

Cloud Services; Scientific Research Network; Supercomputing; Scientific Data

## 1 引言

根据国家创新驱动发展战略,中国科学院提出了“四个率先”的发展战略目标,信息化成为发展战略规划的一项重要内容。“十三五”信息发展规划提出,“中国科技云”建设工程将打造以科技工作者为中心,以资源统一调度和用户自服务为鲜明特色的信息化资源管理与服务云平台。

总体上,“中国科技云”以更强的网络建设为基础,提供更强的“硬”信息化服务和基础设施,包括超级计算环境、海量云存储环境、大数据处理环境等。同时,提供信息资源与软件资源等“软”信息化服务。

经过 20 年坚持不懈的建设,跟随世界信息化技术的发展浪潮,“中国科技云”环境初步形成,可供全院科研人员进行公开共享、无障碍、无缝使用。通过将资源进行深度整合与统一管理,形成了包括中国科学院内外的信息化基础设施(IaaS)、平台

(PaaS) 及软件 (SaaS) 等各类信息化基础资源与服务, 并在此基础之上提供了统一资源管理平台、网络环境、超级计算环境、云计算、云存储与大数据处理环境, 以及信息化资源服务与软件资源服务。本文介绍了中国科技云项目现状、建设成果以及下一步发展方向。

## 2 发展思路与技术架构

“中国科技云”功能架构: “中国科技云”“硬”能力由网络资源池, 超算资源池, 云计算、云存储资源池和大数据处理环境构成。网络资源池 (高速网络及试验床) 为“中国科技云”提供网络环境支持; 超算资源池提供高性能计算服务与应用能力; 云计算资源池和云存储资源池提供云计算、数据密集型处理、云存储和云灾备能力。“硬”能力向本工程内的软件资源池、信息资源池和其他工程提供基础设施层面的资源支持, 并通过资源管理与资助服务平台向科技界用户提供资源服务。软件资源池和信息资源池作为“软”能力, 向中国科学院“十三五”信息化其他工程建设和科技界用户提供信息资源服务和软件资源服务。“中国科技云”建设工程总体架构如图 1 所示。

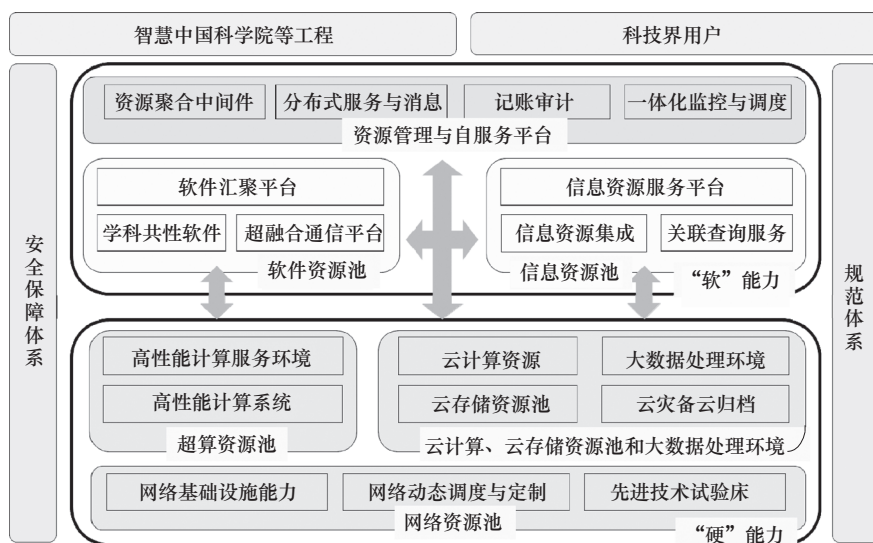


图 1 “中国科技云”建设工程总体架构

## 3 中国科技云资源与服务建设

### 3.1 统一资源管理平台

为提高资源利用率, 降低运维成本, 提高数据共享性, 中国科技云建立了资源管理与统一调度平台, 管理与调度的对象包括计算资源、网络资源、存储资源、数据与文献资源等方面, 并通过建设自服务平台进一步以云服务的方式为科研用户提供

供服务。

目前,为保证统一资源管理平台的正常、高效使用,中国科技云根据功能将业务进行了划分,包括如下四大业务。

(1) 运管与监控业务:致力于提供稳定、安全、可靠的云基础设施服务,实施国家和中国科学院信息化各系统的基础设施运管与监控,承担院信息化专项网络建设任务,提升云基础设施整体运行监控工作的自动化、智能化水平。

(2) 云技术研发与应用业务:致力于云基础设施技术研发和应用服务,承担院信息化专项高性能计算、云计算和云存储的建设任务,承建国家、地方、研究院所等企事业单位云基础设施的研发和建设任务,促进云基础设施技术能力和应用服务水平的提高。

(3) 软件平台研发与应用业务:致力于打造资源的统一调度和用户自服务云平台,承担院信息化专项资源管理与自服务、超融合通信等建设任务,承接国家、地方、研究院所等企事业单位相关软件的研发和建设任务,实现软件平台服务与科技创新的深度融合。

(4) 总体技术业务:致力于云基础设施总体技术的研究和系统设计,加强未来信息化基础设施的应用研发,承担中国科技云建设的总体规划、设计任务和标准规范制定,承接国家、地方、研究院所等企事业单位云基础设施的规划和总体设计任务,强化中国科技云基础设施的技术引领以及服务科技创新的能力。

### 3.2 网络环境

中国科技网(CSTNET)是网络环境建设方面的主体部分和重要基础,CSTNET承担着“对内承载科研信息传输与应用服务、对外拓展信息资源共享与合作”的支撑角色,通过整网基础网络服务能力建设、战略性的香港开放交换节点建设、网间互联互通建设和应对无线技术趋势的新服务四个维度体现了新进展。通过中国下一代互联网(CNGI)之“核心网工程”“驻地网工程”“基于下一代互联网的科研信息基础设施建设和应用示范工程”建设,中国科技网现已具有100G交换能力的核心网,传输能力为155M~2.5Gbit/s的长途骨干网以及1G~10Gbit/s城域网构成网络平台,全面提供IPv4和IPv6双栈接入服务,国际网络出口已达到52Gbit/s,其中中美、中欧之间均为10Gbit/s。

同时,CSTNET面向科研院所、企事业单位用户,通过光纤、数字电路等方式向用户单位提供IPv4/IPv6互联网接入、运维与高速数据传输服务,包括高速、安全、便捷访问互联网络;与国内主流运营商骨干网直连;整体网络质量优异;拥有充足的独立出口带宽;支持用户互联网应用:语音、视频、数据传输、网络会议、办公自动化等。

此外,为进一步加强网络环境建设,中国科技云又采取了一系列的措施。通过建设升级网络基础设施能力,提高网络交换能力、网络可靠性和稳定性;通过建设云网管与服务系统,提供网络运行管控和灵活的服务交付能力;通过先进技术试验床,开



展“中国科技云”服务品质保障与提升、海量数据传输解决方案和前瞻新技术应用的研究。

同时，通过云计算技术深度整合汇聚中国科学院内外的信息化基础设施，建设和运行云基础设施监管平台，并适度发展对研究院所的基础资源远程监管；建设和运维云服务平台，实现分布式异构资源的按需调度、实时监控和全面审计，提供面向个人用户的云资源服务；开展邮件系统、视频会议、科技网通行证、团队文档库、会议平台等基于云资源的特色服务研发与运行保障；加大对各研究院所在信息化基础设施方面运维和应用的培训力度。

以 CSTNET 为基础，以云计算技术为重要支撑，中国科技云进入新的稳步建设发展阶段。

### 3.3 超级计算环境

超级计算环境是中国科技云的一项重要建设内容，“十二五”期间，中国科学院在“三层架构”超级计算环境基础上持续建设，实现了超级计算能力及应用效果的稳步提高，计算能力从百万亿次提高到千万亿次，分中心增加到 9 家，应用学科覆盖更加完整，应用广度和深度均进一步提高。中国科学院超算总中心的主超级计算机已升级为第六代——“元”超级计算系统，计算峰值为 2.36 千万亿次。表 1 为超级计算中心、分中心概况。

表 1 超级计算总中心、分中心概况

超级计算中心	承担单位	特色应用方向	主要计算资源
总中心	中国科学院网络中心	面向全院、全国提供大规模、高品质的超级计算服务	2 300 万亿次“元”超级计算机
兰州分中心	寒区旱区环境与工程研究所	地学、生态学研究	15 万亿次，200TB 存储
青岛分中心	海洋研究所	海洋科学、生物能源与过程研究	26 万亿次，300TB 存储
合肥分中心	合肥物质科学研究院；中国科学技术大学	物质科学计算	106.3 万亿次，227TB 存储；132.6 万亿次，64TB 存储
昆明分中心	昆明植物研究所	生物学、天然药物化学计算领域	10.9 万亿次，100TB 存储
深圳分中心	深圳先进技术研究院	工业计算、云计算	10 万亿次，150TB 存储
大连分中心	大连化学物理研究所	计算化学	11.6 万亿次，30TB 存储
武汉分中心	水生生物研究所	生物信息学	10 万亿次，100TB 存储
沈阳分中心	金属研究所	计算材料	10 万亿次，30TB 存储
广州分中心	广州生物医药与健康院	干细胞与再生医学、创新药物设计等	50 万亿次，77TB 存储

同时,为更好地服务中国科技云,中国科学院进行了超算资源池的建设,其中包括:建设有效支持重大科技基础设施应用需求的计算能力达到 10P 以上的高性能计算系统;以不同学科领域的应用为核心,研究和优化应用服务的关键技术,建设国家级高性能计算基础服务环境;以应用和计算任务为牵引,搭建多学领域的应用移植、部署、优化和测试的异构平台,聚合国家超级计算中心和地方超级计算中心的优质计算资源,扩展多学科领域计算应用的可用计算资源。以服务用户为目标,积极研究和推进多种形式的高性能计算应用服务;拓展开发接口的功能并优化性能,在更多学科领域支持应用社区的建设和发展;提升技术支持和培训的能力和手段,促进高性能计算在更多领域的发展。结合云计算和互联网思维,积极运用新技术开拓科学研究思路,使用新手段突破科学研究瓶颈,提升中国科学院高性能计算服务能力,发挥高性能计算在创新创业中的推动作用。

此外,在超级计算环境的基础之上,正在进行的工作内容包括:在计算化学、CFD 等已有较好工作基础的学科领域,强化计算科学应用软件研发;面向精准医疗、脑科学等新兴学科领域,开展计算应用研发;面向工业界需求,搭建联合创新平台,推进工程计算发展。

### 3.4 云计算、云存储和大数据处理环境

云计算及云存储作为中国科技云的另一项基础设施,为科研大数据的处理和应用提供了环境。

“中国科技云”已具备专有云和公有云特性的混合云环境及存储环境,支撑智慧中国科学院、科学大数据等一系列科研信息化服务。既可满足公有云科研用户即时获取资源、弹性扩展、按需使用付费等自服务,又可满足专有云用户专有服务模式、高安全等保级别、高业务连续性等需求。“中国科技云”的混合云服务平台,具有 12 000 核的计算公共服务能力,面向科研用户提供统一运维、按需开通的资源和服务,科研用户可以创建自己的虚拟数据中心(Virtual Data Center, VDC),帮助科研用户节省建设和运维成本、提高对科研活动的支撑服务水平。

随着云计算、云存储系统陆续上线服务,中国科学院科技数据资源整合与共享海量存储环境已基本建成,以“数据云”服务模式将存储资源、科学数据整合为面向科研的数据基础设施。“数据云”总存储数据量达到 3PB,提供可共享科学数据 456TB,每月存储数据增长量达 50TB,数据基础设施服务日益成为中国科学院科研信息化的基本公共服务。

为进一步加强中国科技云的云计算资源建设,“十三五”工程规划了“云计算资源池”建设,包括云计算基础设施环境建设和数据密集型处理环境建设两个部分。云基础设施环境建设基于开放的 Openstack 技术架构建设的混合云服务平台,通过合理地整合基础设施资源,将提供给全院科研人员按需获取、弹性扩展、高安全等高级别、高业务连续性的资源使用;数据密集型处理环境建设采用基于标准 X86 架构的服务器、通用的网络设备等设施搭建的分布式云计算/存储集群构建的基础运行平台,部署 hadoop、spark、storm 等大数据处理平台软件,对科学大数据的各类应用提供有效的支撑服务。

### 3.5 信息化资源服务

中国科学院在信息化方面完成了管理云、教育云、领域云建设，在“中国科学院仪器设备共享管理系统（简称共享网）”、院网站群、科学传播、新闻宣传和安全保障能力方面也取得了显著的成果。

“十二五”期间建设实施的“科技数据资源整合与共享工程”整合及建设完成了13个学科领域库、7个研究所数据库、20个专业数据库，涉及多个学科领域，这些数据为科研项目乃至经济社会发挥了重要应用，这些数据资源将按照信息资源池的标准规范统一纳入信息资源池。

目前，为进一步提升中国科学院的信息资源共享开放水平，依托“中国科技云”基础设施，信息资源池建设全面展开。信息资源池建设利用“十二五”期间科学数据的已有建设成果，整合已有资源，同时将依托“中国科技云”汇集涵盖科学数据、文献专利、科普教育、项目报告、仪器设备、个人文档等各类信息资源。以资源管理与自服务平台为门户，面向科研信息化及大数据发展，集成整合中国科学院科研活动不断产生的增量信息数据和长期积累形成的各种存量信息资源，建立中国科学院信息资源目录、核心资源内容和主要服务模式。主要内容包括：

- (1) 建立信息资源服务平台，实现跨库检索、资源推荐功能，支持 Web、主流移动终端访问。
- (2) 实现与科学数据、文献专利、科普教育等不同领域的15家以上资源库对接。
- (3) 选择1~2个二级学科领域，实现数据文献关联服务。

### 3.6 软件资源服务

“中国科技云”软件资源池将提供公共和学科领域的共享软件资源云服务，极大地提升融合通信服务能力，促进软件应用与共享生态圈的形成。科研工作者直接使用软件资源池软件进行数据分析、仿真模拟等科研工作，避免重复部署和搭建软件运行环境，可以无缝使用“中国科技云”硬件设施资源。中国科学院将建成“中国科技云”软件资源池，目标如下：

(1) 建成软件汇聚平台，提供公共与学科领域的共享软件资源云服务，实现软件汇聚、分享、评价和服务。制定科研软件发布及服务指南，支持科研领域软件在线汇聚和应用，支持软件发布及软件信息管理以按需服务和推送的方式提供支持服务，提供集中、统一的软件维护、更新、升级等服务，部署科研软件并提供软件生命周期管理服务。

(2) 支持建设学科领域共性软件，形成服务学科的共性软件库，提升学科领域的软件应用水平。针对信息化应用中共性问题与关键技术，软件资源池将支持建设一系列支撑各学科应用的共性软件，包括服务化支撑软件、框架软件、基础算法库、可视化框架软件等，形成信息化应用支撑体系。

(3) 建成超融合通信平台，实现邮件、文件、会议和消息等的集中融合，支持随时随地在线沟通协作。建成后的平台将构建集中统一的多端用户界面，实现邮件、文件、

会议和消息等集中、统一和融合，依托开放平台实现新一代 ARP、网站群、所级应用系统等的无缝接入以及融合通信能力的输出。

图 2 为软件资源池整体架构。软件资源池底层依托于科技云的网络、计算、存储和云计算等基础资源池来提供运行环境、计算资源和存储环境，上层根据资源管理与自服务平台提供的接口规范进行对接，支持学科领域共性软件研发，支持科研软件用户在线使用软件资源，科研用户通过超融合通信平台进行沟通协助。公共和学科领域软件汇聚平台主要功能：软件分类管理，软件用户评价管理，软件汇聚规范接口，软件审核管理，软件用户服务，知识库系统以及软件运行环境；学科领域专业软件主要功能：服务化支撑软件，框架软件，基础算法库和可视化框架软件；超融合通信平台主要功能：邮箱服务，云盘服务，即时通信，会议服务，消息通知和开放平台等；中国科技云通行证作为软件资源池的基础服务，为软件资源池平台内应用提供统一认证服务，也将为其他资源池对接奠定基础；标准接口规范将为软件资源池能力输出以及与其他资源池对接提供 API 和 SDK 的标准规范；应用日志分析作为软件资源池的基础支撑应用。

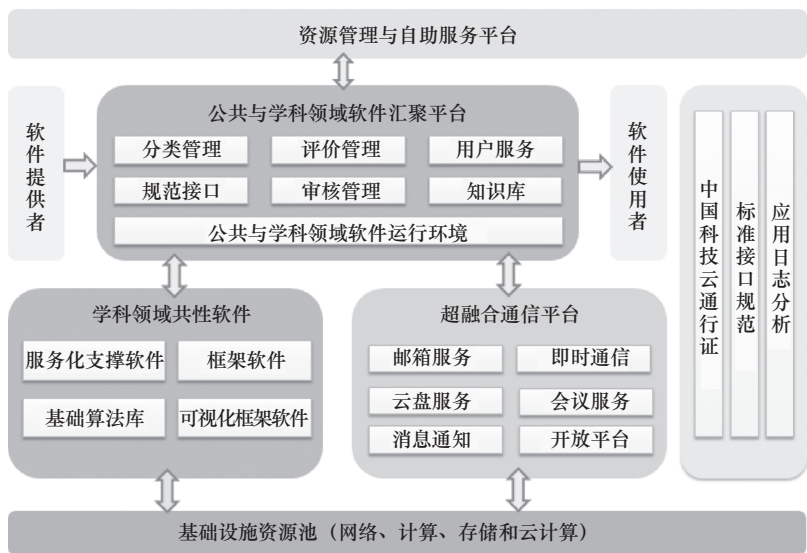


图 2 软件资源池整体架构

## 4 中国科技云发展现状

“十三五”中国科技云建设工程已经全面启动，经过初步的规划与快速的迭代发展，中国科技云在资源管理与自服务平台建设，网络资源池建设，超算资源池建设，云计算、云存储资源池和大数据处理环境建设，信息资源池建设以及软件资源池建设六个方面已取得了很大的成效。



#### 4.1 当前服务能力和应用效果

CSTNET 具有丰富的网络运营经验和运营历史，除中国科学院院属 216 家科研机构外，还包括国家统计局计算中心、国家气象信息中心、地震台网中心等 137 家院外科研单位和高科技企业，服务全国科研用户 100 多万。2017 年度 CSTNET 的国际连通率、国内连通率、核心网服务可用率全部达到 99.99%，骨干网服务可用率全部达到 99.99%，有力地支撑了院内外单位承担的包括“高能所同步辐射光源线站远程监控与数据传输应用”“甚长基线干涉测量（e-VLBI）应用”“空间科学先导专项空间科学卫星地面通讯网络”“ITER 国际高速数据网传输”等在内的国家级、院级重大项目的实施推进。

截至 2017 年 11 月 20 日，中国科技云超算资源设施已开通用户账号 559 个。用户覆盖 21 个省、直辖市及香港特别行政区。用户学科涉及化学、生命科学、信息技术、材料、力学、物理、地球科学、航空航天、天文、数学、能源和工业等领域。截至 2017 年 11 月 30 日，“元”系统上用户提交并完成作业超 600 万个，累计提供机时服务约 1.8 亿 CPU 小时。2016 年 12 月—2017 年 11 月，按用户个性化队列按满负载计算设施利用率达 70% 以上。2017 年度数据存储服务环境可用率为 99.99%，支持了院内外 292 个应用系统。在 2017 年两伊边境地震救灾工作中，中国科技云有力地配合了科技部国家综合地球观测数据共享平台协助伊朗、伊拉克政府减灾机构推进抗震救灾工作的开展，有力地保障了应急数据及时向各国减灾机构推送，得到了国家综合地球观测数据共享平台项目的高度赞扬并致信感谢。

截至 2017 年 11 月底，中国科技云邮件系统的用户总数已经超过 31 万，系统组织数超过 300 家，其中院属用户单位已超过 230 家，各类实验室和课题组 58 个，院属公司 23 个，院内用户数达到 30 万以上，工作日活跃用户百分比达到 31% 以上，2017 年全系统可用率达到 99.99%。视频会议系统 2017 年服务院内单位用户 140 余家，共有视频会议终端 240 台左右。2017 年度，全院范围共召开视频会议 100 余次，参会 50 000 余人次，参会节点数近 2 000 个。桌面会议系统共计发起会议 2 000 余个，参会 8 500 余人次。

#### 4.2 资源管理与自服务平台建设

在资源管理与自服务平台建设方面，所做的工作主要是完成了资源管理与智能调度平台原型设计；云平台调研、测试、剖析与自服务平台原型设计；用户身份统一管理体系原型设计；资源监控平台原型设计；明确需要审计与记账的资源、服务，设计数据库。

#### 4.3 网络资源池建设

实现核心设备的国产化升级改造；完成流量清洗设备的部署；实现网络基础性能监测系统的流量监测、链路质量检测、设备日志监测三大基础功能；在实验室建立小规模的网络试验环境，开展 SDN 技术、5G MEC 技术以及 ICN 技术等预先研发及小规模试验验证。



#### 4.4 超算资源池建设

研究分布式服务架构，支持 200P 以上资源聚合能力；研究应用编译工具，研发基于容器的环境软件的持续构建；聚合以应用为中心的计算资源；建设已发布国产软硬件的试验平台；测试若干应用软件的性能；为高性能计算服务提供试验环境；建立 1 个应用领域的软件集合，研发应用快速部署工具，在多个计算节点上部署；收集软件特征；多种作业提交和管理方式；研发超级计算资源时空地理信息、科学计算数据可视化工具库，实现基础可视化模块与针对标量场的优化可视化模块；优化已有接口的性能；优化和升级计通用计算 portal；开放云平台研发在线文档、在线测试功能；研发机时结算功能；制定平台技术方案，搭建原型验证系统。

#### 4.5 云计算、云存储资源池和大数据处理环境建设

完成基础设施设备的梳理和划分；初步完成多个厂商云平台的测试；完成云计算实施方案的编制；确定云计算平台的选型；新一代云计算平台初步上线，在一定范围内试用和推广；院网站群系统由院机关机房向怀柔 IDC 环境迁移，并在专有云环境部署；完成新一代云计算环境安全系统采购和部署，为专有云环境建设做好安全基础；完成基础设施设备的梳理和划分；完成数据处理环境整体方案的设计；完成基础设施设备的梳理和划分；初完成云存储技术方案的编制；确定云存储平台的选型；新一代云存储平台初步上线，在一定范围内试用和推广；完成新一代云计算环境安全系统采购和部署，为专有云环境建设做好安全基础；完成基础设施设备的梳理和划分；完成容灾备份技术方案的编制。

#### 4.6 信息资源池建设

开始初步建设信息资源服务平台，基本完成平台各项功能模块。归类整理纳入信息资源池的信息资源类型，与相关资源提供者初步沟通，确定相关入池规范。开始初步设计数据与文献、专利的关联查询引擎。

#### 4.7 软件资源池建设

完成平台方案设计以及软件资源分类汇总；基于容器的环境软件的持续集成、测试、发布和部署；初步实现基于用户权限的资源访问控制；部署不少于 10 个常用的科研软件，提供在线访问软件服务；遴选工作完成前期准备和需求分析。

完成初步设计和部分功能实现；完成需求分析和实施方案撰写及细化，开始着手建设网站、APP 和客户端；完成邮件系统版本升级和部分硬件升级工作；完成桌面会议云实施方案，建成新一代桌面会议云（支持同时召开 20 个会议试点环境）；完成云盘选型和建设方案、测试系统建设。

## 5 总结与展望

信息化是当今世界发展的必然趋势。中国科技云从诞生酝酿到建设发展已经经历了 20 年，因此，中国科学院信息化建设积累了一定的服务能力，促进了信息化与科研活动的融合，成为支撑中国科学院科研创新活动不可替代的手段，初步形成全院科研人员可公开共享、无障碍、无缝使用的“科技云”环境。中国科技云在网络基础、超级计算、云计算及云存储服务等方面形成了显著的效果并仍在稳步提高过程中。但是，随着信息技术蓬勃涌现，科研范式转变等带来的爆炸式需求，中国科技云基础资源核心能力、综合服务能力，以及与科技创新活动融合深度融合等能力仍需提高。

同时，科研信息化发展使所有创新主体必须参与全球科研竞争与协作的大环境，信息化基础设施成为科研创新不可缺少的必要条件。随着信息技术的发展日新月异，信息化已经成为支撑国家科技创新的重要手段。但是中国科学院科研信息化技术设施水平和业界发展的水平还存在差距，且有差距拉大的趋势。

为适应信息化发展的需求，根据中国科学院“十三五”信息化发展规划，“中国科技云”建设工程已经全面启动，以“率先行动”和“智慧中国科学院”的需求为牵引，深度整合中国科学院科技资源。中国科技云将进一步加强网络、超级计算环境和海量云存储等公共信息化“硬”能力建设，同时，加快信息资源池和软件资源池“软”能力建设的步伐。打造以科技工作者为中心，以资源统一调度和用户自服务为鲜明特色的信息化资源管理与服务云平台。根据“十三五”的规划，中国科技云将提升各类信息化资源服务的能力，有力支撑各国家级、院级的科研项目的开展。

### 参考文献

- [1] 中国科学院计算机网络信息中心. 十三五中国科技云建设工程实施方案, 2017.

### 作者简介



李俊，中国科学院计算机网络信息中心研究员、博士生导师。主要研究领域为计算机网络。作为课题负责人承担由世界银行贷款的国家重点学科发展项目（NCFC 工程），带领科研攻关小组研发了第一台国产路由器（1992.10），并开通了第一条国际 Internet 线路（1994.4）。作为负责人承担中国科技网（CSTNET）的建设、运行和管理。主持并参与了多项 863、国家自然科学基金面上项目等。现任中国科学院计算机网络信息中心副总工程师，党委委员，科技云运行与技术发展部主任。

# “蛟龙”号载人潜水器声学系统的现状及展望

朱 敏

(中国科学院声学研究所海洋声学技术中心)

摘 要

深海载人潜水器是人类探索和开发深海的核心关键装备，我国研制成功的“蛟龙”号载人潜水器是当前世界上在役载人潜水器中下潜深度最深的。“蛟龙”号声学系统具备通信、定位、测速、障碍物规避、目标搜索和地形地貌观测等功能，特别是其先进的高速水声通信系统可传输图像、数据、文字、语音和摩尔斯码等，高分辨率测深侧扫声纳可探测精细的海底地形图，领先于国际上其他载人潜水器。

未来深海载人潜水器声学系统向全海深、更高水声通信系统能力、更高导航定位精度、探测功能多样化、模块化发展，我国还将实现全面国产化。

关键词

载人潜水器；声学系统；水声通信

Abstract

Deep sea manned submersible is a key technology for deep sea exploring and exploitation. Chinese “JIAOLONG” is the deepest one among manned submersible on duty around the world. The functions of JIAOLONG’s acoustic system include underwater communication, positioning, obstacle avoidance, target searching, high resolution bathymetric scanning, etc. Its advanced high speed underwater acoustic communication system can transmit images, data, text, voice and Morse codes, and its advanced high resolution bathymetric side scan sonar can acquire high resolution 3D map of the sea bottom. The overall performance of JIAOLONG acoustic system is superior to any other manned submersible.

In future, manned submersible acoustic system will develop to full ocean depth, higher underwater communication capability, higher navigation and position accuracy, more measurement functions and modules. And for China, acoustic technologies and instruments will be localized.

Keywords

Manned Submersible; Acoustic System; Underwater Acoustic Communication

## 1 “蛟龙”号载人潜水器简介

深蕴藏着人类社会可持续发展的战略资源，是事关国家安全发展的战略空间，更是大国博弈的重要战场。掌握深海关键技术是我国进入深海、研究深海、开发深海、确保深海安全的必由之路。

“蛟龙”号载人潜水器是国家“十五”863计划重点项目“7 000米载人潜水器”

以及系列海试项目支持下研制和升级改造的成果（见图 1）。项目承担单位是业主中国大洋矿产资源研究开发协会，“蛟龙”号本体的研制单位是中船重工第 702 研究所、中国科学院沈阳自动化研究所和中国科学院声学所，目前由国家深海基地管理中心负责“蛟龙”的运行维护。



图 1 “蛟龙”号载人潜水器

“蛟龙”号设计深度 7 000 米，在 2012 年 6—7 月的 7 000 米级海试中最大下潜深度 7 062 米，创造世界同类作业型载人潜水器深潜新纪录。

“蛟龙”号可搭载 3 人（1 名驾驶员、2 名科学家）下潜到深海海底开展观察和作业，是开展深海科学考察、资源调查、工程作业的利器。2013 年以来，“蛟龙”号在南海、太平洋、西南印度洋等海域开展了冷泉区、锰结核区、富钴结壳区、热液硫化物区等的试验性应用下潜，开展了矿产资源、生物、化学等方面的调查研究，获得了大量的样品、照片、视频和观测数据，发现了大量的新物种，目前已累计下潜 150 多次，标志着我国载人深潜技术和深海资源勘探能力达到国际先进水平。

国外与“蛟龙”号同类的作业型载人潜水器包括美国的 ALVIN 号 [图 2 (a)]、俄罗斯的 MIR1 和 MIR2 [图 2 (b)，现已退役]、法国的 Nautil 号 [图 2 (c)] 和日本的 Shinkai 6 500 [图 2 (d)] 等，与它们相比，“蛟龙”号在下潜深度、电池能量、航行控制、水声通信、作业能力 5 个领域达到世界领先水平，其余技术均达到世界先进水平，综合性能在国际上最优。

“蛟龙号载人潜水器海上试验”获 2013 年度海洋工程科学技术一等奖，“7 000 米载人潜水器蛟龙号”获 2014 年度中国造船工程学会科学技术特等奖，“蛟龙号载人潜水器研发与应用”已通过 2017 年度国家科技进步一等奖评审。

“蛟龙”号的研制成功，使得我国进入了深海载人潜水器领域的世界前列，“蛟龙”号已成为海洋强国建设和中华民族伟大复兴的“大国重器”，载人深潜成为继载人航天后又一个在中国家喻户晓的前沿科技代名词。

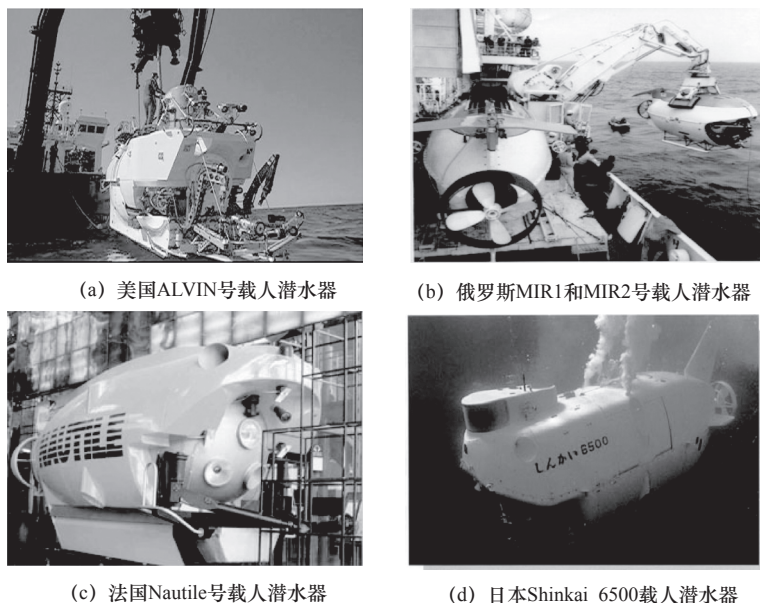


图2 国外与“蛟龙”号同类的作业型载人潜水器

## 2 “蛟龙”号载人潜水器声学系统的功能与组成

由于海水对电磁波的强烈吸收衰减作用，无线电波和可见光在海水中均无法远距离传播，穿透能力最强的长波和蓝绿光也只能传播百米量级。水下远距离的通信、定位、探测等功能都依赖声学技术来实现，声学系统是载人潜水器的关键系统之一。

“蛟龙”号载人潜水器搭载3人下潜到7 000米深海作业，要确保作业的安全性；其主要使命是大洋锰结核、热液、钴结壳、深海生物等方面的勘查作业，任务多样；作业区域包括海山、海脊、海沟、热液区等，环境复杂度高。这些对声学系统的功能、技术指标和可靠性都提出了很高的要求。

中国科学院声学研究所负责“蛟龙”号载人潜水器声学系统的设备研制和系统集成。根据任务使命需求，“蛟龙”号先进的声学系统由水声通信系统、高分辨率测深侧扫声纳、定位系统、成像声纳、声学多普勒测速仪、避碰声纳6种声学设备组成（总体布置如图3所示），它们就如同蛟龙的眼睛、嘴巴、耳朵等感知器官，为蛟龙提供了通信、定位、测速、障碍物规避、目标搜索和地形地貌观测等功能，使潜水器在神秘的深海中可以安全地遨游，开展各种作业。

### 2.1 水声通信系统

为了保证操纵性和安全性，深海载人潜水器与母船之间都是没有缆线连接的，潜水器与母船之间的信息沟通依赖于水声通信系统，因此水声通信系统对保障潜水器作业安全至关重要。“蛟龙”号水声通信系统包括一套常备的高速数字化水声通信系统和一套



备用的水声电话，前者功能全面，既有高速的数字通信能力，可传输图像、数据、文字等，又具有模拟的语音和摩尔斯码通信能力，后者用于模拟的语音通话联系。两者相互配合，保障潜水器与母船的水声通信联系。

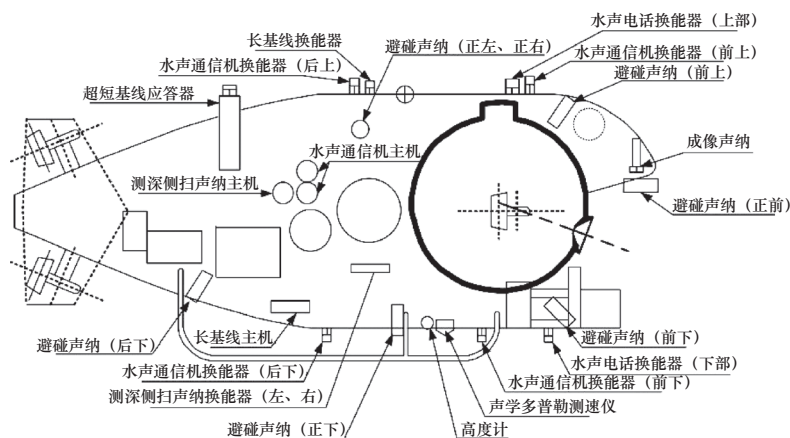


图3 “蛟龙”号载人潜水器声学系统总体布置

## 2.2 高分辨率测深侧扫声纳

高分辨率测深侧扫声纳安装在载人潜水器的两侧，用于测量海底的微地形地貌和海底、水中的目标，实时绘制出现场精细的三维地图。它能在复杂的海底工作，给出目标的高度，因此十分适合在钴结壳区域勘察工作和在大洋热液场测量热液喷口“烟囱”的几何尺寸。国际上其他载人潜水器上均没有高分辨率测深侧扫声纳。

## 2.3 避碰声纳

避碰声纳安装在载人潜水器的四周，能够测量潜水器前上、正前、前下、正下、后下、左、右7个方向障碍物的距离，帮助驾驶员规避障碍物，保证潜水器安全，并为航行控制提供距底高度数据。

## 2.4 成像声纳

在载人潜水器的前部装有机电扫描成像声纳，用于探测前方水中目标及海底地貌，供驾驶员对周围地形环境进行超视距观察，一方面搜索目标，另一方面规避障碍物，保证潜水器安全。

## 2.5 声学多普勒测速仪

声学多普勒测速仪安装在载人潜水器的下部，能够测量潜水器的三维运动速度和下方的海流速度剖面，用于潜水器的控制和导航定位，并为潜水器航行作业提供流速信息。

2.6 定位系统

定位系统包括超短基线定位系统和长基线定位系统，前者由母船上的超短基线定位声纳和潜水器上的应答器组成，后者由潜水器上长基线收发机和投放在海底的多个定位信标组成。定位系统的功能是测量潜水器在水下的位置，实现对潜水器的水平坐标和深度的监控。超短基线数据还需要通过水声通信机从母船把位置信息传送给潜水器，再用于潜水器的水下导航。

表1是国际上与“蛟龙”号同类型的5个深海作业型载人潜水器声学系统组成对比，从表1的对比可以看出，“蛟龙”号声学系统功能在国际深海载人潜水器中是最完善的。“蛟龙”号声学系统的优势在于其高速数字化水声通信系统和高分辨率测深侧扫声纳，这两者都是声学所自主创新的成果，核心技术获得多项国家和美国发明专利，技术水平达到国际先进，部分达到国际领先水平。

表 1 国际上 5 个深海载人潜水器声学系统组成对比

声学设备	中国“蛟龙”号	美国 ALVIN 号	俄罗斯 MIR1 和 MIR2 号	日本 Shinkai 6 500	法国 Nautil 号
数字通信系统	全功能的高速数字通信系统	单一功能，仅做过测试	—	专用于图像传输	专用于图像传输
水声电话	√	√	√	√	√
高分辨率测深侧扫声纳	√	—	—	—	—
声学多普勒测速仪	√	√	√	√	√
前视声纳	√	√	√	√	√
避碰声纳	√	√	√	√	√
定位系统	√	√	√	√	√

3 “蛟龙”号载人潜水器高速数字化水声通信系统

“蛟龙”号载人潜水器的高速数字化水声通信系统采用了先进的水声通信和信号处理技术，具备完善的数据、图像、文字、语音和命令传输能力，在下潜试验中水声通信系统将潜水器的信息准确传送到水面指挥部，使指挥部能够实时掌控潜水器的深度、运动速度、舱内温度、湿度、气压、氧浓度等各种信息，如身临其境，做出决策，指导水下作业，保证下潜安全，提高作业效率，可以实现对“蛟龙”号水下状态的实时监控（见图 4），潜水器里面的乘员还可以与水面母船上的人员进行文字和语音对话，随时就试验情况进行交流；可以回传水下拍摄的作业照片。与国外载人潜水器的水声通信系统相比，其功能和性能都是首屈一指的。先进的高速数字化水声通信系统被评价为“蛟龙”号的三大国际领先技术之一。

在“蛟龙”号立项论证阶段，研制团队分析了国外载人潜水器水声通信系统的技术状态，发现都是以模拟技术的水声电话为主要通信手段，美国的 ALVIN 虽然安装有

低速数字通信机, 但认为用处不大, 实际工作中很少使用; 没有见到俄罗斯的 MIR1 和 MIR2 号上安装水声通信机的文献报道; 日本的 Shinkai 6 500 号和法国的 Nautil 号深海载人潜水器上均安装了日本开发的水声通信机, 专用于向母船传输图像, 其工作频率 16 ~ 24 kHz, 采用 DPSK 调制, 最大通信速率为 16 kb/s, 最大通信距离为 6.5km, 其声纳阵波束角宽为 35°, 垂直上下通信, 信道比较简单, 信噪比高, 可在较高频率工作, 频带较宽, 易于实现高速传输。

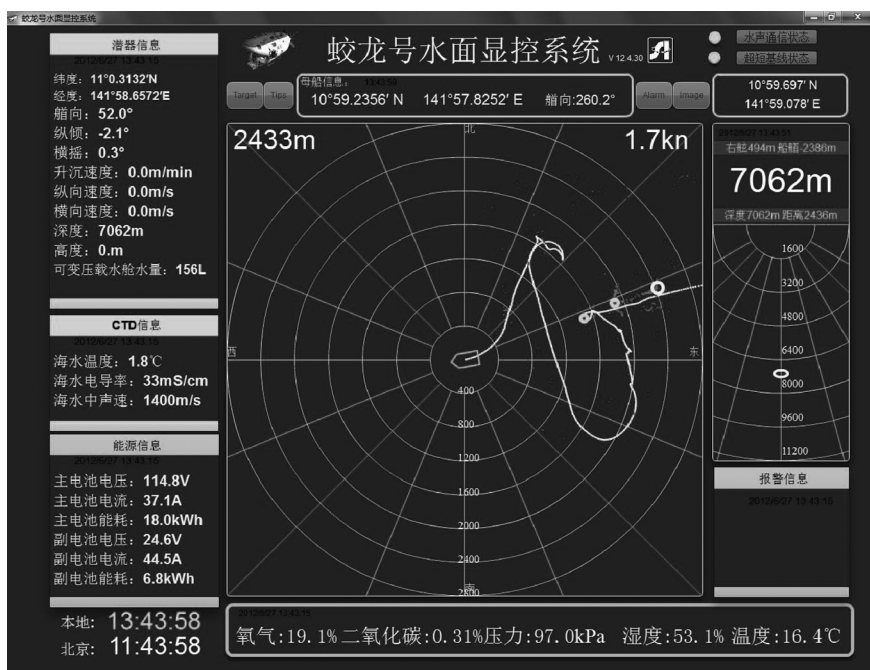


图4 母船通过水声通信机实时监控蛟龙号的状态

当时有三种选择: 第一种是跟随美国的技术路线, 以水声电话为主要通信手段, 数字通信作为辅助; 第二种是跟随日本的技术路线, 以水声电话为主要通信手段, 数字通信传输图像; 第三种则是超越国外, 根据“蛟龙”号的任务使命, 设计以高速数字通信为核心, 以水声电话为辅助的通信系统。前两者技术成熟, 风险小, 但在这一领域的技术水平将不会有多大的进步, 会一直落后于国外; 后者风险大, 但可以推动我国在高速数字水声通信技术的发展。

经过慎重考虑“蛟龙”号的需求、技术发展的需要和当时的技术基础, 项目组认为在几年内能够解决单载波高速数字通信核心关键技术, 决定以当时国际上都还没有成熟的 MPSK 单载波相干通信技术为核心, 以 MFSK 非相干通信技术、FH 扩频技术和 SSB 单边带调制技术为支撑, 来实现高速传输图像、中速传输数据及文字、低速可靠传输指令、模拟传输语音的一套功能全面的水声通信系统。实践证明, 这套设计方案是具有前瞻性的, 在 15 年后的今天, 这套水声通信系统仍然是国际上技术最先进、功能最完善的一套水声通信系统。

为了在具有时延和多普勒双扩散特性的复杂水声信道中实现可靠的 MPSK 相干通信,项目组研究开发了自适应多普勒补偿的多通道自优化判决反馈自适应均衡器与 Turbo 码级联工作的信号处理方法,其核心为快速自最佳最小均方(FOLMS)算法,性能优良,计算量小,在海试中传输图像的效果良好。

为了实现多种信息通过多种通信制式的方便快捷传输,减少潜水器操作人员的操作复杂度,项目组设计了一套发送端数据驱动、接收端自动识别技术,确保了图像、数据、文字和语音等多种信息的可靠实时传输,流程如图 5 所示。在发射端,水声通信系统自动获取各种传感器数据,不需要人工干预;操作人员只需要通过选择图像、对话筒讲话、点击命令按钮、输入文字信息等手段把信息提交给水声通信系统,不需要关注水声通信的通信制式选择、优先级设置、通信时序安排等具体事项,水声通信系统会自动完成所需的操作。在接收端,水声通信系统会自动识别所接收到的信息是什么通信制式,把不同类型的信息分别展示给操作人员。

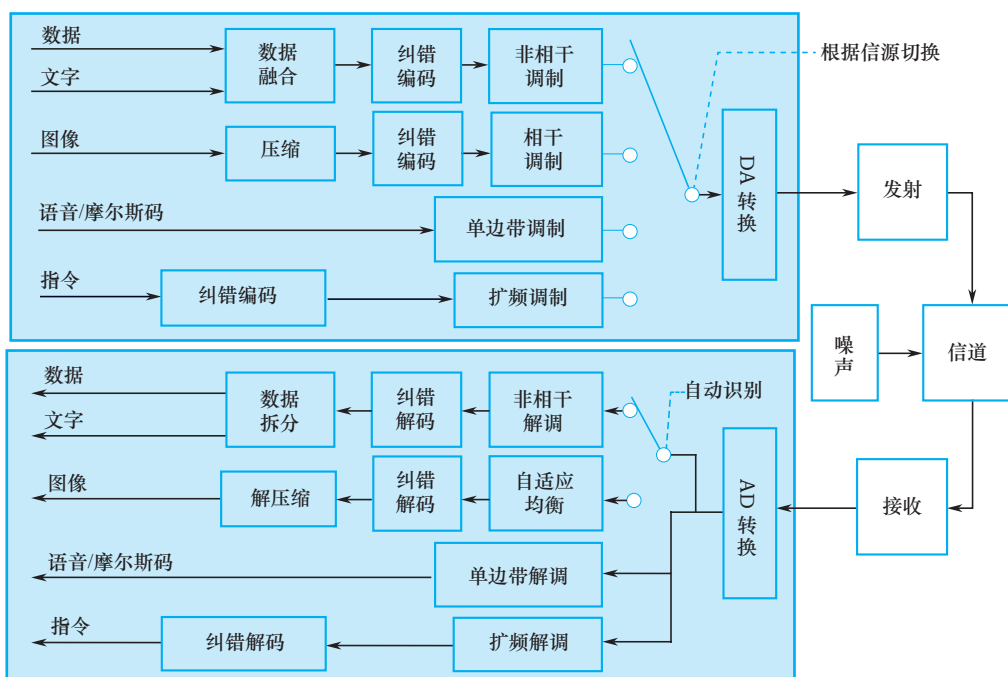


图 5 “蛟龙”号水声通信机多种信息的传输流程

2012 年 6 月 24 日,“蛟龙”号在 7 000 米深的海底与在太空的天宫一号航天员实现了海天对话,这在国际上也是一次创举,可靠的水声通信系统在其中发挥了关键的作用(见图 6)。

在“蛟龙”号海试与 2013 年以来的试验性应用中,“蛟龙”号成功下潜了 150 多次,水声通信系统实现了母船对潜水器的实时监控,保障了母船与潜水器之间顺畅的通信联系,传回了大量现场照片(见图 7),为“蛟龙”号的成功下潜发挥了关键作用。



图6 “蛟龙”号通过水声通信机与天宫一号进行海天对话



图7 “蛟龙”号通过水声通信机传回的部分海底照片

#### 4 “蛟龙”号载人潜水器高分辨率测深侧扫声纳

“蛟龙”号载人潜水器高分辨率测深侧扫声纳是另一项具有国际先进性的声学设备，



可同时获得高分辨率的海底地形图和地貌图，国外的载人潜水器上均没有安装此声纳，不具备对海底地形地貌探测的能力。

高分辨率测深侧扫声纳工作原理如图 8 所示，声纳的信号由近及远逐渐“照射”到海底，海底产生的反向散射信号按时间先后顺序依次被接收线阵接收，采用波达方向估计技术（DOA）的信号处理方法可从中提取出海底回波的方向，进而得到海底的水平距离和高度。其难点在于复杂海底引起的多个不同回波会同时到达声纳阵，另外还有海底和海面的干扰信号，需要从中准确计算出真正的海底位置。

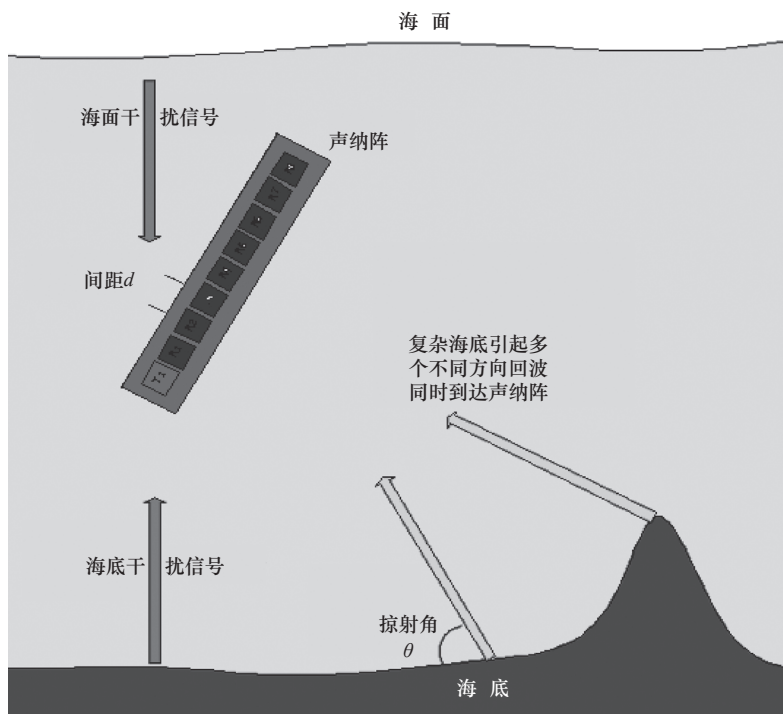


图 8 高分辨率测深侧扫声纳工作原理

声学所从水声物理研究出发，用海底薄层模型解释了原有测深侧扫算法中的主要误差来源，并提出了解决方案，形成了第一代高分辨率测深侧扫声纳技术，应用于 CR02 号 6 000 米 AUV 上，获得了 2003 年国家科技发明二等奖。

以该技术为基础，“蛟龙”号声学团队进一步发展出了一套以专用多子阵海底自动检测——波达方向估计技术（DOA）的信号处理方法为核心的技术方案，并在目标检测算法、宽带信号技术、潜水器姿态修正、测量结果镶嵌等技术方面取得了一系列研究成果，形成了第二代高分辨率测深侧扫声纳技术，应用在“蛟龙”号载人潜水器、6 000 米声学深拖系统和青岛奥帆赛安保系统等项目。所研制的“蛟龙”号载人潜水器高分辨率测深侧扫声纳已经获得了一大批海底高分辨率的结果，图 9 是“蛟龙”号在 7 000 米海底获得的高分辨率地形图（左）和地貌图（右）。

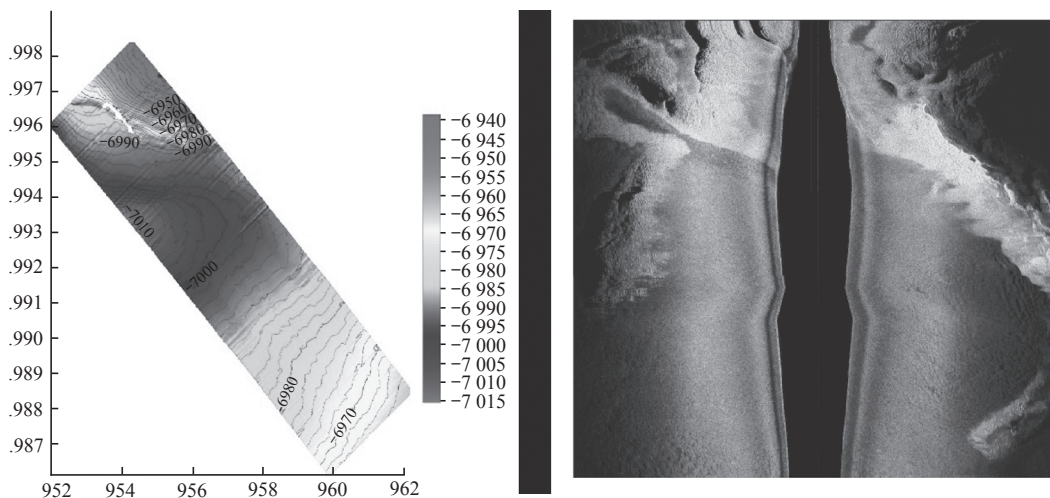


图9 “蛟龙”号在7 000米海底获得的高分辨率地形图（左）和地貌图（右）

第三代高分辨率测深侧扫声纳技术则增加了对海底浅地层剖面探测功能，能够同时实现测深、侧扫和浅地层探测，可称为一体化微地貌探测系统，且所有软件、电子硬件和换能器都实现了国产化。目前该系统已经应用到探海型6 000米声学深拖系统、潜龙号自治水下机器人和4 500米自主勘察系统上。图10是用第三代高分辨率测深侧扫声纳技术获得的千岛湖底的高分辨率地形图，其分辨率和拼图的质量都有了显著的提升。

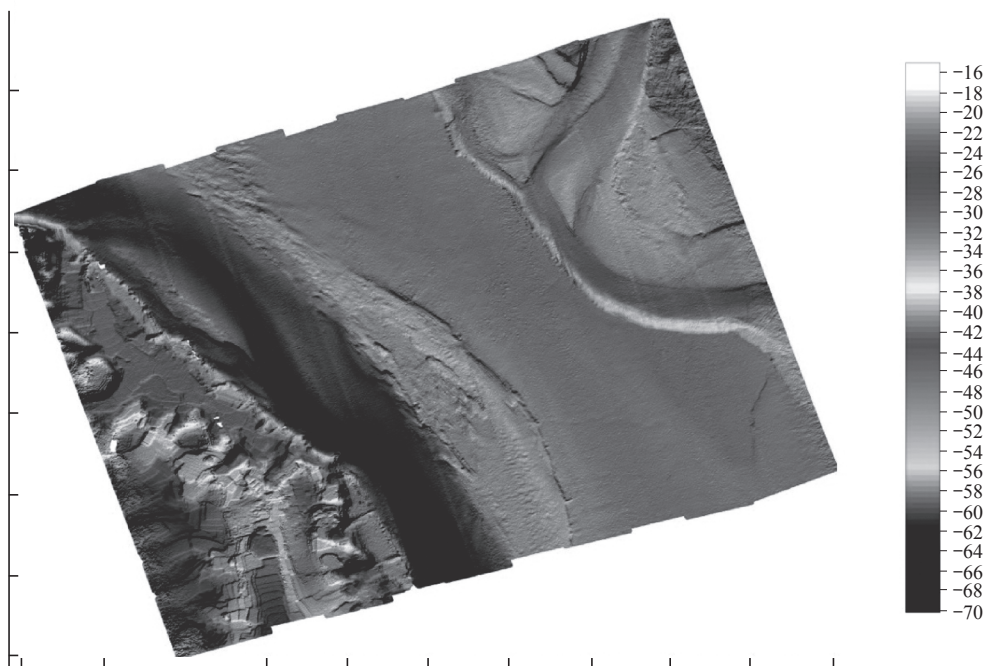


图10 千岛湖底的高分辨率地形图

中国科学院声学研究所目前还在第三代高分辨率测深侧扫声纳硬件的基础上,进一步完善高分辨率测深侧扫声纳产品线的工作,正在研制双频以及低频宽覆盖的换能器,以更好地适应不同情况下的探测需求。

## 5 深海载人潜水器声学系统的发展展望

从近十几年国外载人潜水器声学系统的发展情况来看,包括美国2012年下潜至11 000米深度的“深海挑战者”在内,其声学系统的组成基本上没有变化,仍然是由通信、定位、避碰/测高、前视成像、多普勒测速等组成,在某些应用下临时加装多波束测深声纳作为探测设备使用,通信系统仍然以水声电话为主。“蛟龙”号的声学系统在水声通信和探测功能上进行了突破,是国际载人潜水器技术领域发展的一个亮点。

展望载人潜水器声学系统的发展,主要包括以下几个方面。

### 5.1 更大深度

目前载人和无人潜水器正在向全海深发展,我国已经在研制全海深载人和无人潜水器,相应地声学系统也必须在“十三五”期间解决大深度下可靠工作、更远距离可靠通信定位的问题。

### 5.2 提高通信系统能力

需要不断完善水声通信技术,提高通信距离、通信速率和正确率。

### 5.3 提供导航定位精度

需要提高超短基线定位技术的精度,并研究有效的组合导航算法,提高潜水器在水下的定位精度。

### 5.4 多平台协作

未来深海载人潜水器将从独立工作向多平台协同作业发展。我国已经研制了“蛟龙”号7 000米载人潜水器、深海勇士号4 500米载人潜水器,正在研制全海深载人潜水器,另外还有多型的无人潜水器和着陆器等水下平台。为了实现这些水下平台在同一个作业区内的多平台协同作业,必须在实现水下组网通信,这就要求制定有效的通信协议并形成统一的通信标准。

### 5.5 探测功能多样化、模块化

目前载人潜水器声学系统的探测功能还比较单一,国外载人潜水器上除了保证潜水器安全所需的探测声纳以外,很少安装其他探测声纳。“蛟龙”号上的专用探测设备是

高分辨率测深侧扫声纳,但在很多潜次任务中并不使用。

未来载人潜水器声学探测设备将向多样化、模块化发展,可根据作业使命(如大范围搜索残骸、高精度地形测绘、海底地层剖面测量等)换装不同的探测模块。

## 5.6 全面国产化

“蛟龙”号载人潜水器中前视成像声纳、声学多普勒测速仪、定位系统是进口的;通信、测深侧扫和避碰声纳换能器早期也是进口的,后期则实现了国产化替代。

深海勇士号载人潜水器在国产化方面前进了一大步,除了前视成像声纳以外都实现了国产化。

在“十三五”期间,全海深载人潜水器声学系统将实现全国产化。

## 参考文献

- [1] 路铁群. 蓝绿激光通信及探潜[J]. 光电子技术与信息, 1991(2): 1-7.
- [2] Kilfoyle D B, Baggeroer A B. The state of the art in underwater acoustic telemetry[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2000, 25(1): 4-27.
- [3] Michiya Suzuki, etc. Digital Acoustic Image Transmission System For Deep-Sea Research Submersible. Oceans'92 Conference Proceedings, Oct., 1992, 2:567-570.
- [4] 朱维庆, 朱敏, 武岩波, 等. 载人潜水器“蛟龙”号的水声通信信号处理[J]. 声学学报, 2012, 6:565-573.
- [5] 崔维成, 刘峰, 胡震, 等. 蛟龙号载人潜水器的 7000 米级海上试验[J]. 船舶力学, 2012, 16 (10):1131-1143.
- [6] William Kohnen. Manned Research Submersibles:State of Technology 2004/2005[J]. Marine Technology Society Journal, 2015, 39(3):121-126.
- [7] Kudo K. Overseas trends in the development of human occupied deep submersibles and a proposal for Japan's way to take. Science and Technology Trends, 2008, 26: 104-123.
- [8] <http://www.whoi.edu/main/hov-alvin>.
- [9] <http://www.jamstec.go.jp/e/about/equipment/ships/shinkai6500.html>.
- [10] [https://en.wikipedia.org/wiki/Mir\\_\(submersible\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Mir_(submersible)).

## 作者简介



朱敏,男,中国科学院声学研究所二级研究员,博士生导师,海洋声学技术中心主任,科技部重点领域创新团队“水声通信创新团队”负责人。长期从事海洋声学技术研究和仪器研发,主要研究方向包括水声通信与组网技术、声学测速技术、声学探测技术和声学系统集成。担任“蛟龙”号载人潜水器副总设计师,研制完成的声学系统技术先进、功能完善,与国外同类载人潜水器相比,在功能和性能上都居于前列,先进的水声通信和海底微地形地貌探测能力是“蛟龙”号载人潜水器的标志性成果之一。担

任“十三五”重点研发计划“全海深潜水器声学技术与装备研制”、“十一五”863 重点项目“水声通信网络节点技术及组网关键技术”、国家重大科学仪器设备开发专项“自容式声学多普勒流速剖面仪”负责人。获 2003 年度国家科技发明二等奖、2006 年度军队科技进步三等奖、2013 年度海洋工程科学技术奖一等奖、2013 年度中国科学院杰出科技成就奖、2014 年度中国造船工程学会科学技术奖特等奖、全国五一劳动奖章、中国科学院十大杰出青年等奖励和荣誉，入选第二批国家“万人计划”科技领军人才。



## 虚拟核电站与核安全的综合模拟仿真

吴宜灿 胡丽琴 龙鹏程 尚雷明 王 芳 何 桃

宋 婧 汪 进 郝丽娟 俞盛朋 郑晓磊 FDS 凤麟核能团队

(中国科学院核能安全技术研究所, 中子输运理论与辐射安全重点实验室)

### 摘 要

核安全是我国核能与核技术利用事业发展的生命线。将核科学与信息科学深度融合, 实现核电站多尺度复杂物理过程精准仿真, 对提升核电站安全水平具有重要意义。中国科学院核能安全技术研究所·FDS 凤麟核能团队在“核信息学”学科研究的基础上, 研发了数字环境下的虚拟核电站平台 Virtual4DS, 支持核电站多工况安全、核事故演化过程以及核应急智慧决策等多场景、大时空综合仿真。平台在大型核工程中取得了良好应用, 为核能系统创新设计、运行安全以及核应急决策提供了有力支撑。

### 关键词

核信息学; 虚拟核电站; 核安全仿真; 核应急<sup>①</sup>

### Abstract

Nuclear safety is called the lifeline of nuclear technology and its applications. Comprehensive numerical simulation which deeply integrated nuclear technology with advanced information technologies can accurately simulate the complex and multi scale physical processes, and predict system behavior and safety performance, and it can be used to effectively promote the safety level of nuclear power plant. Based on “Nuclear Informatics”, the FDS Team developed the Virtual Nuclear Power Plant in Digital Society Environment “Virtual4DS”. It provides design and operation simulations, accident warning and process simulations, large-scale radionuclide diffusion and environment impact assessments, nuclear emergency exercises and intelligent decision-making regarding nuclear energy.

### Keywords

Nuclear Informatics; Virtual Nuclear Power Plant; Nuclear Safety Simulation; Nuclear Emergency

## 1 引言

核能是人类历史上一项伟大的发现, 开启了人类能源发展历史的新纪元。经过 60 多年的发展, 核能已在世界范围内获得广泛应用。然而, 历史上曾发生过三起严重核事故<sup>[1-3]</sup>, 造成了巨大的财产损失和广泛的社会与环境影响。核能的发展必须以安全为前提, 发展安全、高效的核能系统是必然趋势。我国高度重视核安全问题, 习近平主席在

<sup>①</sup> 基金资助: 中国科学院信息化专项项目 (XXH13506-104)、国家科技部国家科技基础条件平台项目“国家基础科学数据共享服务平台” (DKA2017-12-02-17)、国家磁约束核聚变能发展研究专项项目 (2014GB112000) 等。

海牙第三届核安全峰会上,将核安全纳入国家总体安全体系<sup>[4]</sup>,2016年在华盛顿第四届核安全峰会上,再次强调加强核安全文化建设、推广核安全监督体系<sup>[5]</sup>。2017年9月,《中华人民共和国核安全法》通过第十二届全国人民代表大会常务委员会第二十九次会议表决,成为我国首部核安全法<sup>[6]</sup>。核安全已上升为我国国家战略,成为国家安全的重要组成部分。

核安全重点研究核电站内部行为及其对环境与社会的影响。核电站反应堆内部行为及其对环境影响研究涉及中子物理学、热工水力学、材料学、机械与结构力学、化学、辐射生物学等多学科交叉的物理过程,这些物理过程相互作用,互为关联,表现出极强的复杂性。为了揭示上述过程的物理特性与演化行为,一般可以通过理论研究、数值模拟和实验等手段进行探索。在信息化技术快速发展的推动下,先进的数值模拟可以尽可能地还原系统内的复杂物理过程,并对系统的物理与安全行为进行预测,有助于开展精确的安全设计与评价工作。结合社会科学数字社会环境(数字地球、数字气象、数字交通等),还可以对事故状态下放射性核素扩散及其对生态环境的影响进行预测与评价,对公众影响与社会影响进行模拟推演,为核应急提供决策支持。发展综合模拟与虚拟仿真理论与方法,在设计、运行与事故应急等阶段对核电站、环境与社会等不同范围进行模拟,揭示其全周期、全范围的系统行为,已经日益成为研发安全、高效核能系统的重要途径。

国际上在核安全仿真的研究方面,经历了从单个物理现象的数值模拟到多物理耦合仿真的数字反应堆,再到融合了环境与社会信息的虚拟核电站三大阶段。数字反应堆是基于基础科学理论与模型,将单个物理现象模拟进行集成,开展中子学综合模拟和其他物理(如热工水力学、结构力学等)过程的耦合计算,可再现和预测反应堆全空间全周期综合行为,对基础物理问题模拟研究、反应堆设计与安全分析、反应堆监管和运维仿真等具有重要应用价值。然而,随着人们对核安全认识的加深,认识到核安全不仅仅涉及反应堆本身,反应堆对公众和环境的影响越来越受到人们的重视和关注。因此,对核电站全生命周期安全性的研究,除了对反应堆行为进行仿真,还需要依托虚拟核电站开展环境中的事故演化过程模拟、环境影响后果预测、面向社会公众的核应急过程推演与指挥决策模拟等。虚拟核电站是以数字反应堆为核心,与数字社会深度融合的核电站全范围综合仿真平台,在数字反应堆基础上,更加注重核电站以及环境的大时空综合物理行为模拟,同时更加关注核安全与生态环境、社会公众的相互关系。因此,发展虚拟核电站技术是实践“理性、协调、并行”的中国核安全观的重要手段,也是促进核电安全、健康、持续发展的重要研究手段。

本文首先介绍国内外在核安全综合仿真方面的研究现状及未来发展趋势,结合中国科学院核能安全技术研究所·FDS 凤麟核能团队(以下简称凤麟团队)承担国家重大核科技任务过程中,对综合模拟与数值仿真方面的切实需求,介绍了凤麟团队在虚拟核电站建设以及核安全综合仿真方面的一些实践与认识。

## 2 国内外研究现状

核能领域最早利用建模和仿真技术开展相关研究的工作可以追溯到20世纪70年代,

但早期工作主要针对核电站的单个子系统、单个物理问题开发相应的设计或分析软件。随着核能的不断发展及人们对核安全认识的提升,为了再现核电站全空间全周期综合行为、预测事故环境下放射性核素对环境的影响,研究人员对核安全仿真开展了大量相关研究。

美国为确保其国际热核聚变实验堆 ITER 合作项目中发挥更重要的作用,发展了 FSP 项目<sup>[7]</sup>,为美国发展聚变电站设计与安全研究平台奠定了基础;美国轻水反应堆先进仿真联盟 CASL<sup>[8]</sup>针对现役压水反应堆研究先进的建模和仿真技术,发展具有可进行预测性仿真功能的数字反应堆;美国核能先进仿真与建模 NEAMS 项目<sup>[9]</sup>针对先进反应堆研发及核燃料循环系统的分析和设计需求,开发了一套具有预测功能的计算分析程序<sup>[10]</sup>。欧盟在核能综合仿真方面开展了 NURESIM<sup>[11]</sup>系列项目,旨在建立一个供欧洲核反应堆仿真通用的参考平台。福岛核事故发生后,欧盟决定在 NURESIM<sup>[12]</sup>平台的基础上发展核反应堆安全仿真平台 NURESAFE,用于轻水反应堆安全分析、运行和工程设计。NURESIM 项目还重点关注综合仿真平台的集成问题,开发了开源的集成平台 SALOME<sup>[13]</sup>。此外,针对核应急决策,欧洲研发了 RODOS 系统<sup>[14,15]</sup>,其目的是在核事故的各个阶段,对距离事故地点所有范围内对事故的后果以及各种可选择的应急干预措施做出评价和预测。美国的放射性物质大气排放模拟系统 NARAC<sup>[16-17]</sup>针对有害物质的多尺度大气流动和扩散模型,可以处理放射性、化学、生物及自然泄放扩散过程。日本发展了辐射应急剂量评价实时计算机决策支持系统 SPEEDI<sup>[18]</sup>。

国内在核安全仿真方面,除笔者所在项目团队外,各大核电集团、研究院所和高校也先后开展了集成仿真相关的算法、平台以及应用研究工作。多家核电单位针对核反应堆结构设计与操纵员培训开展了较深入的集成仿真平台研究工作,例如,中核集团核动力研究设计院的 NESTOR 软件包<sup>[19]</sup>、国家电力投资集团公司的 COSINE 软件包<sup>[20]</sup>、中广核工程公司的“智能电站”<sup>[21]</sup>、国家核电上海核工程研究设计院的“数字化电厂”<sup>[22]</sup>、中国原子能科学研究院的“数字微堆”等<sup>[23]</sup>。北京应用物理和计算数学研究所与中国工程物理研究院高性能数值模拟软件中心,针对核设施反应堆安全评估、运行、延寿、退役和新堆设计开展了数字反应堆工程研究<sup>[24]</sup>;哈尔滨工程大学开展了培训模拟机研发工作<sup>[25]</sup>;清华大学工物系、西安交通大学、上海交通大学<sup>[26]</sup>和华北电力大学也都开展了一些核分析模拟的研究与开发工作。

然而,“集成”与“应用”是虚拟核电站区别于其他仿真系统的根本指标,所以合理可行的集成策略和技术手段对虚拟核电站的持续发展至关重要,且具有不同应用目标的虚拟核电站在集成策略上具有共性问题,在发展虚拟核电站时应优先和重点考虑。从国内外发展现状来看,目前世界各国的研究工作还主要集中在数字反应堆层面;关注“核电站-环境-社会”的全时空集成仿真与应用的研究工作已成为发展趋势。

### 3 数字社会下的虚拟核电站

风麟团队 20 世纪 90 年代起开始探索虚拟核电站的内涵,启动了“数字社会环境下的虚拟核电站 Virtual4DS”研发计划<sup>[27-29]</sup>,Virtual4DS 旨在融合数字社会与核电站行为,

发展体系化的核能系统设计与安全评价平台。根据“三步走”发展战略，早期以理论创新为基础发展了以中子输运设计与安全评价软件系统<sup>[30]</sup>为代表的系列物理工程计算软件系统；随后，通过自主化核能软件的研发与整合，实现多物理耦合仿真的数字反应堆平台；此后，利用大数据、人工智能、移动互联网、云计算、物联网等先进信息技术，将数字反应堆与数字环境和数字社会充分融合，实现“核电站-环境-社会”的大时空综合仿真，并基于该平台开展核科学、生态学、社会科学等多学科交叉研究。

### 3.1 总体设计与系统架构

Virtual4DS 以核安全精准评价与核应急智慧决策为系统特色，以体系化、自主化先进核能软件为核心，基于多物理耦合模拟，借助云计算、大数据、虚拟仿真等先进信息技术，面向特定应用目标进行功能扩展，实现了核能系统典型工况下全范围安全性能的综合预测与核应急决策，可应用于核电站安全、辐射安全与环境影响、核应急与公共安全三大方面的特性评价与性能预测，如图 1 所示。

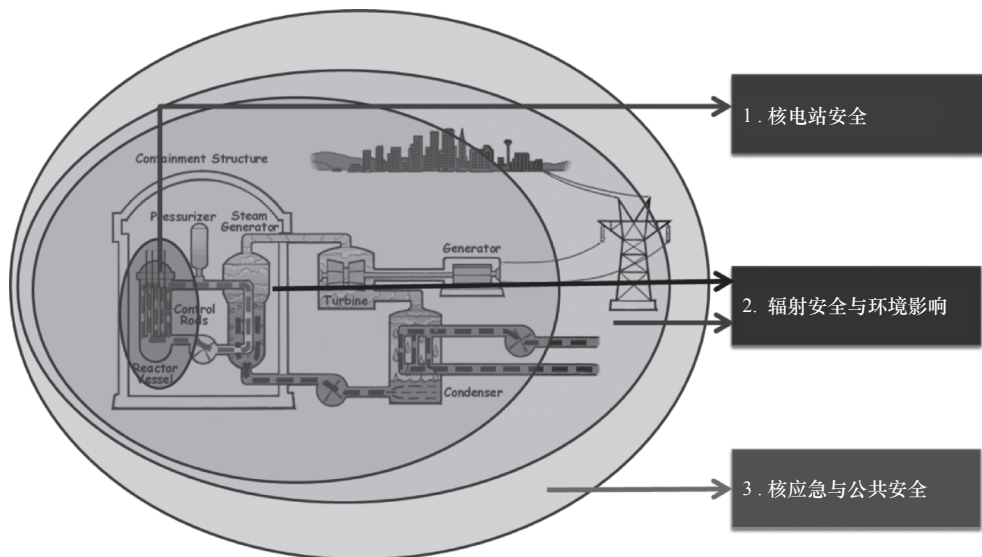


图 1 虚拟核电站 Virtual4DS 应用领域

基于物理工程核心计算软件，综合考虑中子物理学、热工水力学、结构力学、材料行为、燃料性能、反应堆安全、辐射安全与环境影响等耦合模拟，发展体系化的设计与安全评价软件，实现反应堆的全过程可视化设计仿真、全范围动态 3D 运行仿真，最终实现多物理过程耦合的反应堆综合行为高保真预测。实现不同物理过程计算软件与数据的无缝集成，并利用虚拟现实技术提供高真实感、沉浸感的直观虚拟漫游体验，同时还支持虚拟装配与设计验证、维修计划与虚拟培训、职业照射剂量评估与优化等功能，可应用于基础物理问题模拟研究、反应堆设计与安全分析、反应堆监管和反应堆运维仿真等场合。

Virtual4DS 特色功能主要包括：多物理过程耦合智能核安全设计、核电站运行安全



仿真评估、核事故进程模拟与环境影响评价、核应急仿真演练与智慧决策。其功能架构如图 2 所示。

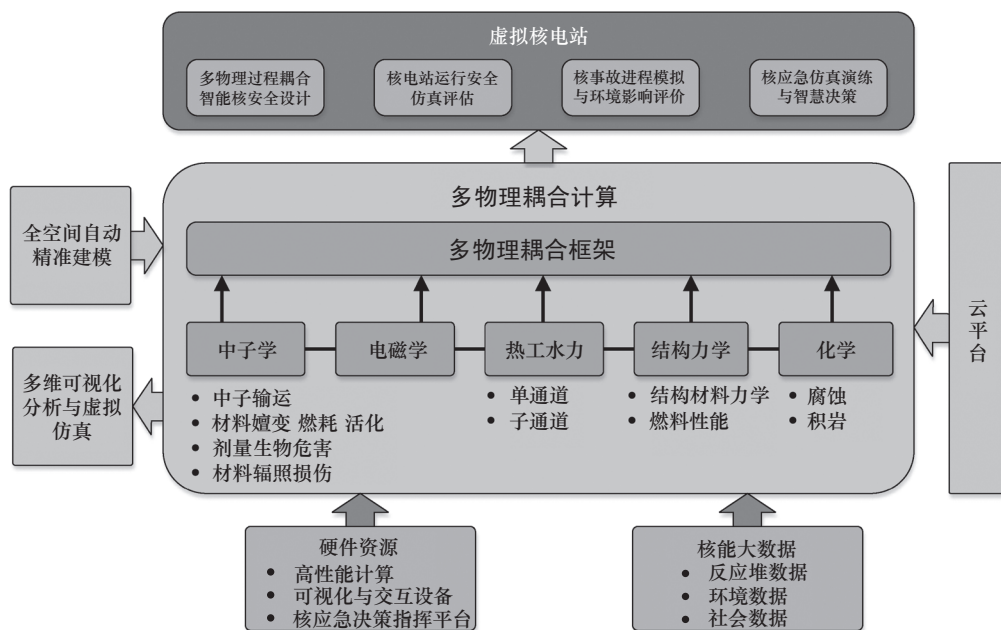


图 2 Virtual4DS 功能架构

### 1. 多物理过程耦合智能核安全设计

以辐射输运为核心，支持包含燃料、辐射源项 / 剂量 / 生物危害、材料活化与嬗变等的中子学全过程计算，支持热工水力学、结构力学、化学、生物学等多物理耦合计算，以集成、统一、灵活的方式进行耦合并易于扩展，集一体化非规则自动精准建模、可视化与虚拟仿真、云计算框架于一体，以支持反应堆等核系统多物理多尺度的高保真模拟。可基于多维、多速率场、多相、多组件欧拉模型和结构传热传质的流体动力学模型进行反应堆瞬态的模拟。基于该耦合功能，多物理耦合计算可用于核电站的设计与优化。

### 2. 核电站运行安全仿真评估

基于反应堆多物理高保真模拟功能及高性能计算集群、交互式仿真系统等硬件设备，实现核电站运行工况下的临界安全、反应堆安全、辐射安全分析与预测。与核电站实时信息监控系统对接，获取核电站实时运行数据，通过数据匹配完成核电站虚拟现实场景中设备状态信息的耦合，“沉浸式”的三维直观展示核电站设备运行状态和现象。为核电站运行阶段的性能评价与状态预测提供了新的手段，有助于提高运行安全管控水平。

### 3. 核事故进程模拟与环境影响评价

基于大数据的故障诊断和预测功能，通过对接入的在线数据进行模型匹配和仿真推



演,发现现场运行中不易察觉的或潜在的故障,为操作人员和管理人员提供故障预警和辅助决策功能。基于对核电站的设备故障预警,同时获取设备配置状态的变化以及外部环境的改变,通过与核电站风险模型耦合分析,获得对核电站事故的类型及风险大小的预警。将所获得的核电站事故类型预测结果导入事故进程模拟器,可提前预知核电站未来最有可能发生的事故的详细进程。系统通过反应堆和环境的关键辐射参数物联网监测和控制,结合放射性物质多尺度多介质扩散的模拟推演,支持核事故状态下放射性物质在环境中的分布和扩散趋势的快速、准确模拟推演,为核事故应急响应和决策提供数据基础支持。

#### 4. 核应急仿真演练与智慧决策

核电站若发生重大放射性释放事故,正确、及时的应急救援行动对遏制事故蔓延至关重要。通过核应急实景演练具有成本昂贵、演练环境对人员具有辐射危害、救援处置场景难以多次复现等问题。虚拟核电站通过沉浸式交互仿真技术,逼真地将复杂的事故救援场景展示在受训人员面前,并通过三维交互设备,与虚拟场景实时互动,并对受训人员在模拟训练中的训练效果进行智能评估和分析,实现仿真演练的目的,具有安全、经济、可重复等优点。此外,可以通过演练过程的经验反馈识别出影响应急决策的决定因素,结合后果评价对核能事故的发展趋势进行精确的分析预测,进而对核应急能力进行有效的评估,结合数字预案,建立核能事故的应急决策模型,实现核能事故的智慧应急决策。

### 3.2 系统特色与关键技术

凤麟团队积极推动核科学与信息技术的深入交叉融合,提出了“核信息学”学科概念,将先进信息技术与核能领域的应用需求有机结合,构建了涵盖理论、算法、软件、数据、科研信息化环境等内容的学科体系。在核信息学理论体系的指引下,发展如下虚拟核电站关键技术。

#### 1. 几何与物理高保真精准建模

发展了基于 CAD 的建模技术,实现了从实际复杂工程 CAD 模型到蒙特卡洛计算模型的自动精准转换,显著提高了建模质量与效率<sup>[31-33]</sup>。可导入及创建模型、层次化定义堆芯等逻辑层次结构、定义几何边界条件、指定热传输与冷却剂传输途径等信息。基于统一的模型可转换为基于面的半空间、以基本体及其布尔运算、混合半空间与基本体及其布尔运算等不同方式描述的计算几何,可扩展支持国际主流核计算软件 MCNP、FLUKA、Geant4、TRIPOLI、PHITS 等之间的模型转换<sup>[34]</sup>,可基于统一模型转换成基于构造实体几何表示法 CSG 体元、结构网格<sup>[35]</sup>、非结构网格及其耦合<sup>[36]</sup>表示的多物理耦合计算模型。能对几何模型中丢失粒子等错误进行检查及对模型自动进行修复、重构、分解等预处理,保证计算模型的正确性。同时根据计算模型反转重构 CAD 模型或面片模型,可通过三维动态可视化方式检查及修改模型。同时支持对计算物理属性的自

动建模,实现完整计算模型的建立,特别是复杂的辐射源分布建模(如聚变堆等离子源等)、交互式计数建模、材料建模等。自动精准几何与物理建模如图3所示。

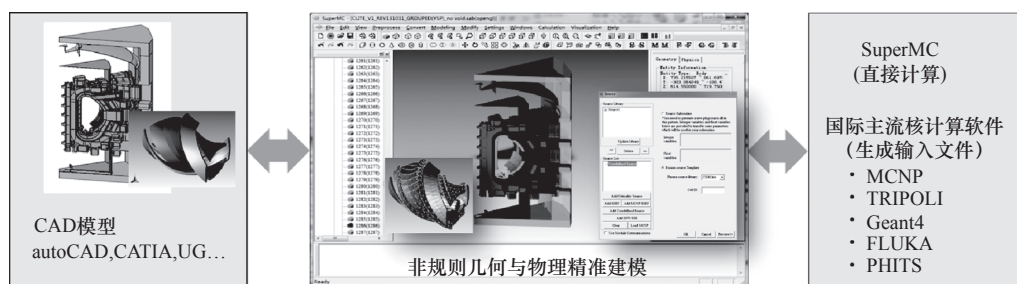


图3 自动精准几何与物理建模

## 2. 一体化高效云计算

复杂物理过程和大尺度模拟对计算和存储资源要求极高,同时反应堆迭代设计、事故影响推演等对模拟的效率提出了更高的要求。平台通过云计算框架以服务定制的方式提供核计算分析的功能,用户只需要通过网络访问简单的用户图形界面,即可立即高效地在庞大的软硬件资源池上执行任务,避免花费大量的精力在高性能计算集群的软硬件、数据等运行环境与安全上,实现“即需即用”;基于虚拟化技术将异构、跨网络、跨区域的高性能计算集群进行了资源整合,形成了庞大的硬件资源池,结合计算任务的特点与资源池进行了资源的使用预测与动态调配,保证了任务执行中资源的利用率,提高了整体任务的运行效率,使得复杂的反应堆现象高保真预测成为可能。

平台集成了用于核计算实验数据、数值模拟数据、监测数据以及与环境、社会相关的气象数据、地震数据、地质数据、水文数据、经济数据、政治数据、核能舆情数据等融合,为核安全分析、评价与应急决策提供了丰富的数据资源。基于统一的数据交换和模块接口,用户可用定制数据流和工作流的方式定义计算核心模块的耦合方式及耦合流程;云计算服务器端可对分布式的任务请求进行统一、高效的任务调度和智能监控、预警。对核数据、材料数据、任务文件数据、计算核心数据等进行统一管理并并行存储,可根据计算任务快速查找所需数据。

为提高计算效率,发展了覆盖计算全过程的综合加速方法。例如,系列基于粒子位置预判的几何跟踪加速方法,解决大型反应堆输运计算中几何处理耗时问题;基于栅元信息多交叉树快速定位的大规模计数方法,解决蒙特卡洛计算时间随计数数目线性增长的问题;时间、空间、能量等维度多方法耦合的蒙特卡洛-确定论混合计算方法,解决了核设计中大空间及深穿透的求解难题。

## 3. 多维动态可视化仿真

在虚拟核电站的仿真模拟中,多维可视化与虚拟仿真是辅助设计分析的重要手段。综合模拟过程中,会产生分布于空间、能量、时间等多个维度的数据,如通量密度、剂量、温度、压力等,为了能够直观地分析这些数据,平台提供了多风格、多维度数据可视化分析功能,如二维图、三维体绘制、网格、基于几何的数据裁剪以及不同数据的统

一颜色映射，并可进行几何表面或几何轮廓线与数据场叠加可视化。

为提高涉核作业的安全性合理性，对作业方案进行模拟演练与人员受照剂量预评估可有效地降低工作人员的辐射剂量。利用立体显示与人机交互技术，提供了辐射环境中的虚拟漫游与器官剂量精细评估<sup>[37]</sup>，允许用户在安全的虚拟世界对辐射环境下各类应用方案进行仿真设计以及优化，实现了辐射环境下维修方案的人员工作路径虚拟漫游、人机交互和人体器官受照剂量实时评估。多维多风格动态可视化分析效果图如图4所示。

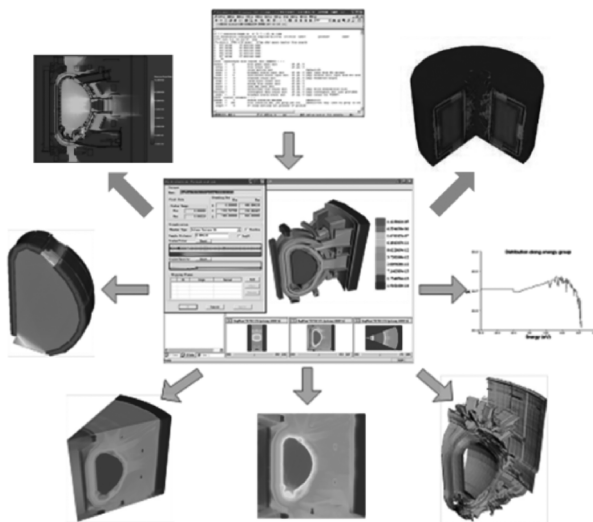


图4 多维多风格动态可视化分析效果图

## 4 核安全综合仿真实践

Virtual4DS 采用软件工程标准进行研发过程全周期管理，以程序对标与体系化国际基准相结合的方式验证，采用分离确认实验、综合确认实验、工程确认实验方式进行确认。物理计算核心软件已通过国际聚变实验堆（ITER）基准模型、国际临界安全基准实验评价手册 ICSBEP 等 2 000 余个国际基准模型，以及流强国际第一的强流氦氟中子源 HINEG、世界最大的多功能液态铅铋实验装置群 KYLIN 等国际一流实验装置的验证与确认。建成了虚拟核电站综合实验平台，拥有百万亿次高性能计算集群、~ 1PB 存储设备以及三维立体仿真设备等，如图5所示。

Virtual4DS 包含的相关核心软件，已通过国际经济合作与发展组织核能署 OECD/NEA、全球规模最大的能源科技计划“国际热核实验反应堆”ITER 组织等国际认证，在全球 60 多个国家获得应用，已经应用于聚变堆、裂变堆等反应堆的安全分析与应急决策中，并已应用于 30 多个国际重大核工程项目，包括 ITER、欧洲聚变示范堆 E-DEMO、德国螺旋石仿星器 W7-X、中国三代自主商用堆型“华龙一号”、中国铅基反应堆 CLEAR 等。被 ITER 组织选为基准软件，应用于中子学与核分析<sup>[38-44]</sup>中，创建

了 ITER 中子学标准模型。在核电站、海洋核动力平台方面,开展了核应急场景仿真、核应急模拟训练,支持严重核事故情况下的应急救援。相应技术与软件系统,被应用于中国核安全云的建设。相关成果也被领域内相关著名专著收录<sup>[45]</sup>。



图 5 虚拟核电站实验平台

#### 4.1 国际热核实验堆 ITER 综合仿真

聚变能是人类未来最理想的清洁能源。聚变堆作为一种新型核能装置,有许多物理问题、技术问题、工程问题亟待解决。“国际热核聚变实验堆”ITER 计划是目前全球最大的科技合作项目,耗资 1 000 多亿元。相对二代、三代反应堆,ITER 具有结构复杂、部件多、物理过程复杂等典型特征。ITER 主机基准模型包含 7 万个体、40 余种混合材料,直径约 34 米,高约 26 米。复杂的物理、几何结构和巨大的体积使得开展 ITER 安全综合仿真极其困难。

基于 Virtual4DS,凤麟团队实现了 ITER 的综合安全仿真,支持多物理耦合分析自动建模、结果分析与可视化、场内维修方案过程虚拟漫游仿真和精确人体辐射剂量评估等,支持聚变反应堆设计、运行和维修等方案设计优化,聚变堆新物理现象和规律模拟预测以及人员维修剂量、电子器件辐照损伤等核与辐射安全评价。同时,Virtual4DS 是一个协同科研平台,支持基于云的任务管理与协同工作。

基于 Virtual4DS,凤麟团队完成了十余项 ITER 中子学分析的工作,包括创建系列 ITER 核分析基准模型并发布给各国使用、大厅辐射剂量场评估、生物屏蔽插件分析、冷却水活化分析、热室屏蔽分析、赤道窗口屏蔽分析等;完成了内侧 TF 线圈核热沉积精细评估、室内观测系统核分析及屏蔽优化、放射性废物评估等大量核分析工作,分析结果发现超导等核心系统的辐射安全设计缺陷,被 ITER 科学理事会评价为重要进展,并追加 2 000 多万欧元用于修正设计错误;计算了 ITER 全时段中子辐照下,在装置窗口室、赤道窗口末端等全堆重要区域,90 多种重要核素和 17 种广泛使用材料在不同时刻的活化特性,编制了首个 ITER 活化安全指导手册,系统地预测了 ITER 全寿期的活化演化进程,绘制出 ITER 的辐射剂量安全演化图谱,为 ITER 顺利通过安全审查提供了重要支持<sup>[46,47]</sup>;开展了维修方案过程虚拟漫游仿真和精确人体辐射剂量评估等,支持聚变反应堆设计、运行和维修等方案设计优化。ITER 主机精细模型与辐射场可视化如



图 6 所示，ITER 大厅辐射场分析评估如图 7 所示。

基于以上工作实践，凤麟团队领衔美国能源部 DOE、欧盟委员会 EC、俄罗斯国家原子能集团 ROSATOM、法国辐射防护与核安全研究院 IRSN、ITER 国际组织等七家国际著名核能研究机构联合开展聚变能安全理论研究，发表了聚变安全领域国际首篇 nature 集团期刊论文，阐明了聚变能系统的安全特性，揭示了聚变能发展的关键安全与物理问题，并提出了聚变能系统设计的安全理念和方法<sup>[48]</sup>。

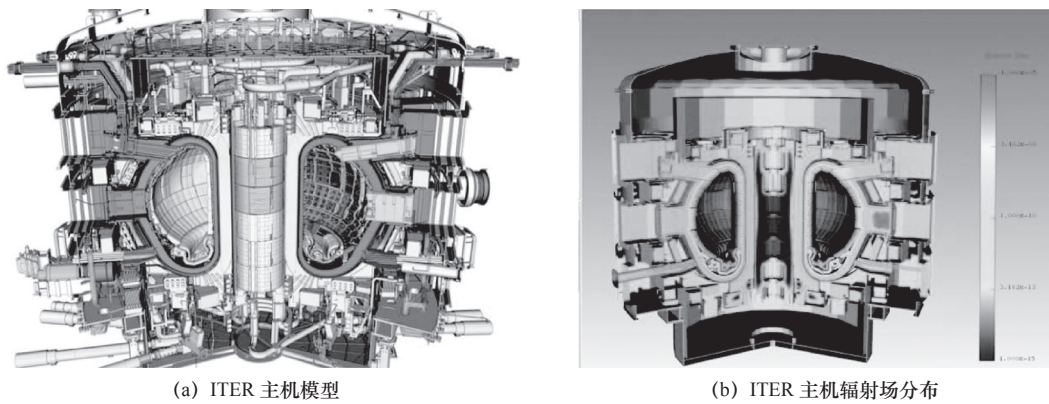


图 6 ITER 主机精细模型与辐射场可视化

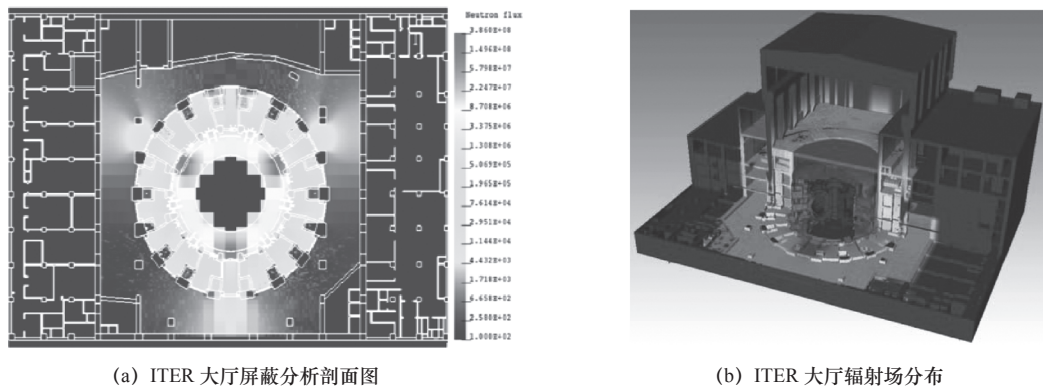


图 7 ITER 大厅辐射场分析评估

4.2 中国铅基反应堆综合仿真

铅基反应堆是第四代核能系统的参考堆型之一，也是中国科学院战略性先导科技专项 ADS 嬗变系统的首选参考堆型，凤麟团队基于虚拟核电站 Virtual4DS 开展了中国铅基反应堆 CLEAR 以及模块化小型堆“核电宝”的设计研究<sup>[49,50]</sup>。反应堆的建设本身就是一个极其复杂的巨大系统工程，要将传统大型反应堆设计成集装箱大小，对计算分析和综合模拟提出了严峻的挑战。

在高保真精准建模、多物理耦合高效计算等核心技术的支持下，凤麟团队利用 Virtual4DS 开展了中国铅基系列反应堆综合仿真工作，为中国小型模块化铅基堆“核



电宝”建立了精细的全空间一体化计算精准模型；开展中子学全过程以及中子学与其他物理过程的耦合模拟，为小型模块化铅基堆“减重、减容”提供了重要的技术支持，如图 8 所示。



图 8 小型化铅基堆“核电宝”

此外，凤麟团队还为中国铅基反应堆 CLEAR 开展全堆物理特性模拟快速迭代设计，预测并解决反应堆设计、建设、运行全周期中的潜在物理和工程问题，从而加快反应堆设计、建设周期，提高经济性、可靠性和安全性，并为反应堆的安装、运行、维修提供操作人员培训，如图 9 所示。

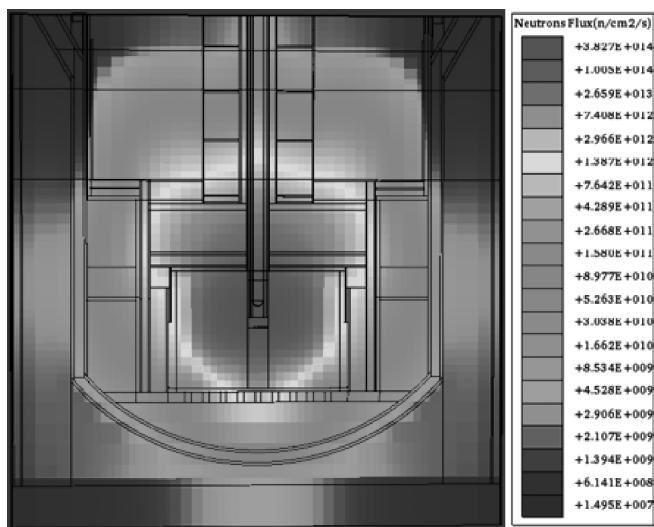


图 9 中国铅基反应堆 CLEAR 堆本体辐射安全综合仿真

在此基础上，利用虚拟现实和海量数据实时可视化技术，完成了反应堆 4D 交互式验证，包括核电站运行与事故仿真、环境中核素扩散模拟、核应急智能决策等功能，为严重事故进程模拟、事故预警、源项分析、后果分析提供了核能大数据支持，支持铅基堆安全分析和事故演化过程仿真。中国铅基反应堆 CLEAR 维修方案验证综合仿真如图 10 所示。

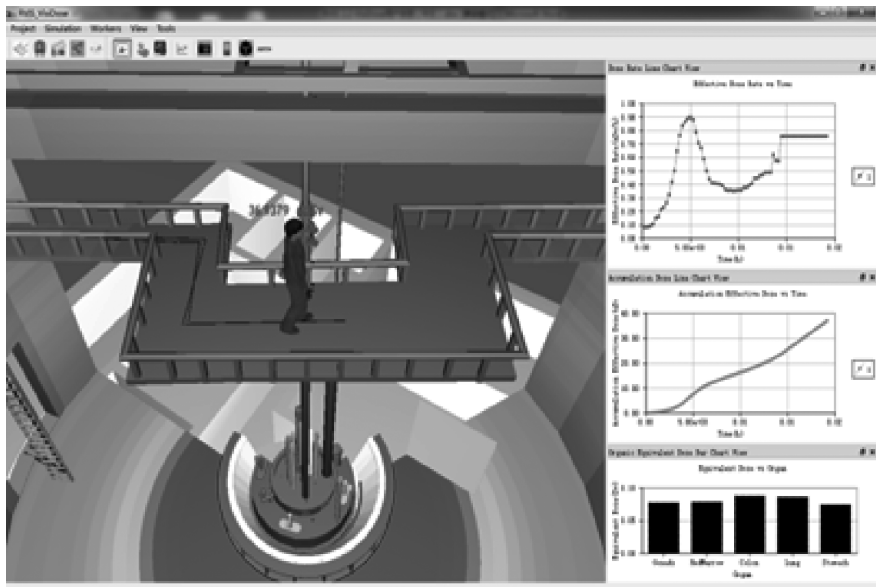


图 10 中国铅基反应堆 CLEAR 维修方案验证综合仿真

Virtual4DS 在中国铅基反应堆综合仿真的成功应用，促进了国际新型反应堆设计流程的革新，为先进核能系统设计提供了重要平台。

5 总结

虚拟核电站是核安全综合仿真发展的必然趋势，在几何与物理高保真精准建模、一体化高效云计算、多维动态可视化仿真等关键技术的支撑下，凤麟团队研发了数字社会环境下的虚拟核电站 Virtual4DS，实现了多物理过程耦合智能设计、运行安全仿真、事故进程模拟与环境后果预测，以及核应急仿真演练与智慧决策，已应用于国际热核实验堆 ITER、欧洲联合环 JET、中国自主商用新一代核电“华龙一号”等 30 余个国际重大核工程项目。

面向未来，在虚拟核电站的研究方面，凤麟团队将进一步围绕核能安全、高效发展，通过重大核工程的综合仿真应用，深入发展反应堆安全、辐射安全与环境影响以及核应急与公共安全等方面的综合模拟技术，更好地服务于核电站的运行安全与先进核能系统的创新设计。

参考文献

[1]联合国原子辐射效应科学委员会 (UNSCEAR). 电离辐射源与效应——UNSCEAR 2008 年联合国大会提交的报告和科学附件 [R]. 2008.

[2]IAEA. The Chernobyl Accident: Updating of INSAG-1 [R]. INSAG-7, 1992.

[3]IAEA 专家团. 日本福岛核事故调查报告 [R]. 核动力运行研究所 编译 . 2011.

[4]习近平在荷兰海牙核安全峰会上的讲话（全文）. <http://world.people.com.cn/n/2014/0325/c157278->

24724171.html.

- [5] 习近平. 加强国际核安全体系, 推进全球和安全治理——在华盛顿核安全峰会上的讲话. [http://news.xinhuanet.com/politics/2016-04/02/c\\_118517898.htm](http://news.xinhuanet.com/politics/2016-04/02/c_118517898.htm).
- [6] 中华人民共和国核安全法. [http://npc.gov.cn/npc/xinwen/2017-09/01/content\\_2027930.htm](http://npc.gov.cn/npc/xinwen/2017-09/01/content_2027930.htm).
- [7] Arnold K.D. Keyes. Fusion Simulation Project Workshop Report [J]. Journal of Fusion Energy, 2009, 28: 1-59.
- [8] CASL project summary. [http://web.ornl.gov/sci/nsed/docs/CASL\\_Project\\_Summary.pdf](http://web.ornl.gov/sci/nsed/docs/CASL_Project_Summary.pdf).
- [9] NEAMS executive program plan, <http://energy.gov/ne/downloads/nuclear-energy-advanced-modeling-and-simulation-neams-program-plan>.
- [10] Predictive simulation. <http://energy.gov/ne/advanced-modeling-simulation/predictive-simulation>.
- [11] Christian Chauliac, Jose-Maria Aragones, Dominique Bestion, etc, NURESIM—A European simulation platform for nuclear reactor safety: Multi-scale and multi-physics calculations, sensitivity and uncertainty analysis [J]. Nuclear Engineering and Design, 2011:3416-3426.
- [12] NURES SAFE\_D1\_11\_Project\_Presentation\_v1\_2. <http://www.nuresafe.eu/index.php?-art=31>.
- [13] The open source integration platform for numerical simulation(SOLOME), <http://www.salomeplatform.org/>.
- [14] Sinkko K. RODOS: Decision Support System for off-site Nuclear Emergency Management In Europ[J]. Theologie Und Philosophie, 2002.
- [15] Andronopoulos S, Schichtel T, Efthimiou G, et al. Updates of the atmospheric dispersion models inside the Local Scale Model Chain of RODOS regarding particles[J]. Radioprotection, 2016, 51:S101-S103.
- [16] Turner D.B. Workbook of Atmospheric Dispersion Estimates: An Introduction to Dispersion Modeling (2<sup>nd</sup> ed.) CRC Press. 1994, [www.crcpress.com](http://www.crcpress.com).
- [17] Sugiyama G, Nasstrom J S, Probanz B, et al. NARAC Modeling During the Response to the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant Emergency[J]. 会议论文. 2012, 49(3):281-286.
- [18] Chino M, H. Ishikawa, H. Yamazawa. SPEEDI and WSPEEDI: Javapese Emergency Response Systems to Predict Radiological Impacts in Local and Workplace Areas due to a Nuclear Accident [J]. Radiation Protection Dosimetry, 2011, 50 (2-4): 145-152.
- [19] 我国首套自主核电软件包和一体化软件集成平台发布. [http://chinadaily.com.cn/micro-reading/dzh/2015-12-17/content\\_14410312.html](http://chinadaily.com.cn/micro-reading/dzh/2015-12-17/content_14410312.html).
- [20] 国家电投发布 COSINE 核电软件包. <http://energy.people.com.cn/n1/2015/1221/c71661-27957047.html>.
- [21] “智能电站”技术方案通过评审, 将陆续用于中国核电项目. <http://www.chinanews.com/ny/2014/06-25/6320407.html>.
- [22] 周健文, 郑明光, 刘凯. 核电厂操纵员支持系统实现技术研究 [J]. 自动化仪表, 2015, 36(11): 22-25, 29.
- [23] 邢帆. 我国数字微堆获技术突破 [J]. 中国信息化, 2016(8): 22.

- [24] 范宣华, 肖世富, 陈璞, 等. 大规模结构动力学并行计算与软件研发进展 [J]. 力学季刊, 2016, 37(3): 421-432.
- [25] 王贺, 成守宇, 张志俭. 操纵员运行支持系统中状态监测方法研究 [J]. 核动力工程, 2010, 31(2): 71-75.
- [26] 刘中坤, 彭敏俊, 赵强, 等. 核设施退役虚拟仿真系统框架研究 [J]. 原子能科学技术, 2011, 45(9): 1080-1086.
- [27] 刘鹏飞, 杨燕华, 杨永木, 等. 虚拟现实技术在核电厂仿真中的应用 [J]. 原子能科学技术, 2008, 42(增刊): 169-175.
- [28] 吴宜灿, 胡丽琴, 龙鹏程, 等. 先进核能软件发展与核信息学实践. 中国科研信息化蓝皮书 2013[M]. 北京: 科学出版社, 2013: 232-244.
- [29] 吴宜灿, 胡丽琴, 龙鹏程, 等. 核能信息化科研协同平台研发与虚拟核电站应用实践. 中国科研信息化蓝皮书 2015[M]. 北京: 科学出版社, 2015: 170-179.
- [30] 吴宜灿, 李静惊, 李莹, 等. 大型集成多功能中子学计算与分析系统 VisualBUS 的研究与发展 [J]. 核科学与工程, 2007, 27(4): 365-373.
- [31] Wu Y C, Song J, Zheng H Q, et al. CAD-based Monte Carlo program for integrated simulation of nuclear system SuperMC [J]. Annals of Nuclear Energy, 2015, 82: 161-168.
- [32] Wu Y C, Song J, FDS Team. Development of Super Monte Carlo Calculation Program SuperMC2.0 [C]. Proceedings of International Conference ANS National Meeting-2013 ANS Winter Meeting and Technology Expo, American Nuclear Society, Washington D.C., USA, November 10-14.
- [33] 吴宜灿, 李莹, 卢磊, 等. 蒙特卡罗粒子输运计算自动建模程序系统的研究与发展 [J]. 核科学与工程, 2006, 26 (1): 20-27.
- [34] 吴宜灿, 俞盛朋, 程梦云, 等. 多物理耦合分析自动建模软件 SuperMC/MCAM5.2 设计与实现 [J]. 原子能科学技术, 2015, 49(增刊): 23-28.
- [35] H. Hu, Y. Wu, M. Chen, et al. Benchmarking of SNAM with the ITER 3D Model[J]. Fusion Engineering and Design, 2007, 82(15-24): 2867-2871.
- [36] J. Zhang, L. Hu, Q. Zeng, et al. Development and Application of MC-SN Coupled Auto-modeling Tool RCAM1.0[J]. Fusion Engineering and Design, 2011, 86(9-11): 2783-2786.
- [37] Y. Wu, T. He, L. Hu, et al. Development of Virtual Reality-Based Simulation System for Nuclear and Radiation Safety[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2015, 29: 77-85.
- [38] Ying D C, Zeng Q, Qiu Y F, et al. Assessment of radiation maps during activated divertor moving in the ITER building [J]. Fusion Engineering and Design, 2011, 86(9-11): 2087-2091.
- [39] Dang T Q, Ying D C, Yang Q, et al. First Neutronics analysis for ITER bio-shield equatorial port plug [J]. Fusion Engineering and Design, 2012, 87: 1447-1452 .
- [40] Yang Q, Dang T Q, Ying D C, et al. Activation analysis of coolant water in ITER blanket and divertor [J]. Fusion Engineering and Design, 2012, 87(7-8): 1310-1314.
- [41] Yu S P, Yang Q, Chen C, et al. Shielding design for activated first wall transferring in ITER hot cell

- building [J]. Journal of Fusion Energy, 2015, 34(4): 887-894.
- [42] Q. Yang, B. Li, C. Chen, et al. Shielding Analysis for ITER Equatorial Port Cell During Blanket Replacement [J]. Journal of Fusion Energy, 2015, 34(4): 875-881.
- [43] S.Zheng, E.Polunovskiy. Nuclear Heat of TF Inboard Legs with Fine Structures of Inboard Blanket [R]. INAR-001, 2007.
- [44] A. Turner, R. Pampin, M.J. Loughlin, et al. Nuclear Analysis and Shielding Optimisation in Support of the ITER In-Vessel Viewing System Design [J]. Fusion Engineering and Design, 2014, 89: 1949-1953.
- [45] 吴宜灿. 聚变中子学 [M]. 北京: 中国原子能出版社, 2016.
- [46] Yican Wu. Fusion Neutronics[M]. Springer Science & Business Media, 2017.
- [47] 吴宜灿, 等. 核安全导论 [M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2017.
- [48] Wu Y. et al. Identification of safety gaps for fusion demonstration reactors. nature energy 1, 16154, doi:10.138/nenergy.2016.154 (2016).
- [49] 吴宜灿, 柏云清, 宋勇, 等. 中国铅基研究反应堆概念设计研究 [J]. 核科学与工程, 2014,34(2):56-63.
- [50] Y. Wu, Y. Bai, Y. Song, et al. Development Strategy and Conceptual Design of China Lead-based Research Reactor[J]. Annals of Nuclear Energy, 2016, 87: 511-516.

### 作者简介



吴宜灿, 研究员 / 教授, 博士生导师, 中国科学院核能安全技术研究所所长、中国科学院中子输运理论与辐射安全重点实验室主任、国际能源署 IEA 聚变能经济环境安全技术合作计划执委会主席、国际原子能机构 IAEA 顾问专家、国际热核实验堆 ITER 组织核安全与许可证技术专家组成员、第四代核能国际组织 GIF 铅基堆中方首席技术代表。

主要从事核能中子物理与安全技术研究。主持包括 IAEA 及 ITER 国际合作计划、国家“973” / “863”计划、国家自然科学基金重大项目、国家磁约束核聚变专项、中国科学院战略性先导科技专项等重大项目 30 余项。发表论文 500 余篇, 担任 FED 国际期刊副主编及其他 10 余个知名学术期刊编委。获国家自然科学基金二等奖、国家科技进步一等奖、国家能源科技进步奖一等奖等 10 余项奖励。



## 北斗卫星时间系统的建设与应用

董绍武<sup>1,2,3</sup> 武文俊<sup>1,2</sup> 张首刚<sup>1,2,3</sup>

(1. 中国科学院国家授时中心 ; 2. 中国科学院时间频率基准重点实验室 ;  
3. 中国科学院大学天文与空间科学学院)

### 摘 要

在建的我国北斗全球卫星导航系统, 目前已经具备了亚太地区的导航定位和精密授时功能。预计我国 2020 年将建成包括 35 颗卫星的全球系统, 实现全球覆盖。随着北斗系统的建设和逐步完善, 其在各领域的应用研究也正在逐步展开。卫星导航定位系统能完成精密导航、定位和授时任务, 都是建立在具有高精度的时间基准和时间同步基础之上的。因此, 所有卫星导航定位系统都建有独立的内部时间系统 GNSST, 导航系统的时间系统都溯源至其国家标准时间 UTC(k), 通过 UTC(k) 与国际标准时间 UTC 的常规比对功能, 实现其与国际法定标准时间的同步和统一, 从而实现其授时应用功能。中国科学院国家授时中心负责我国标准时间的产生、保持和发布工作, 保持的我国时间基准 UTC(NTSC) 是北斗时间的溯源参考。为推动我国北斗系统的发展和应用, 国家授时中心基于国际时间比对链路, 开展了北斗远距离时间传递等研究工作, 并取得初步成果, 证明北斗系统具备了远距离精密时间传递的能力。本文简要介绍了我国北斗导航卫星系统相关时间以及我国时间工作的最新进展, 描述了信息化在时间工作中的应用情况。

### 关键词

北斗 ; 信息化系统 ; 时间传递 ; UTC ; 导航定位 ; 授时 ; 溯源

### Abstract

BeiDou can provide Position, Velocity and Time (PVT) service continuously in the Asia-Pacific area at present. It will launch 35 navigation satellites until 2020. As the development of BeiDou, it was started to apply to many fields. Because of the high precise time reference and synchronization, satellite navigation system can realize the positioning, navigation and timing service. Every GNSS has independent time system, called GNSST, and it is traced to the national official time UTC(k)s whose divergence with respect to UTC has been kept stable within several ns in most time. Due to the satellite navigation system time has synchronized to UTC, they can provide timing service. BeiDou system time is traced to UTC through UTC(NTSC) which is maintain by National Time Service Center(NTSC), Chinese Academy of Science. In order to promote the development and application of BeiDou, NTSC implemented the BeiDou international common view time comparison and got the preliminary result. It is proved that BeiDou can realize the long baseline time transfer. In this paper, BeiDou system, BeiDou time international co-operation, the relationship between BeiDou time and UTC, development of time service of China and the application of information system in time service work are introduced.

## Keywords

BeiDou; Information System; Time Transfer; UTC; Navigation and Positioning; Time Service; Traceability

## 1 概述

时间是国家重要的战略参数和资源。精密时间是科学研究、科学实验和工程技术诸方面的基本物理参量,它为一切实力学系统和时序过程的测量和定量研究提供必不可少的时基坐标<sup>[1]</sup>。现代守时工作的标志是基于原子秒长的时间尺度的建立以及原子钟在守时工作中的广泛使用。随着原子钟性能的提高以及远距离高精度时间比对手段的出现,国际原子时(TAI)的计算方法、工作规范不断完善并持续改进<sup>[2]</sup>。随着天文学、物理学等自然科学学科的发展,它们对于时间尺度的稳定性提出了越来越高的要求。过去的半个世纪中,全世界实际应用的时间尺度从稳定度为 $10^{-8}$ /天的地球自转产生的世界时(UT)过渡到目前稳定度达 $几 \times 10^{-15}$ /天甚至更高的原子时(TA),其中不仅包含了世界时向原子时转化的一个质的变迁,原子频标本身在稳定性方面约每7年提高一个数量级则是更为重要的发展。为科学应用提供具有高稳定性的时间系统,是世界上所有的时间实验室的共同任务。目前最准确的原子钟由最初的准确度 $10^{-11}$ 到铯原子光钟 $10^{-19}$ <sup>[3]</sup>,远距离比对手段由罗兰系统的微秒量级发展到目前卫星双向时间频率传递(TWSTFT)和全球卫星导航定位系统(GNSS)精密单点定位(PPP)的亚纳秒级,精度提升了1万倍<sup>[4]</sup>。

现有的全球卫星导航定位系统都采用测时体制,GNSS是把精确定时用于定位的一个典型例子。每颗GNSS卫星上均装备有原子钟(星载钟),通常GNSS系统时间(GNSST)由地面和星载钟通过综合处理得到<sup>[5]</sup>。基于时间测量的现代全球卫星导航定位系统,不仅具有导航定位能力,而且一般都有精密授时功能,即PNT(Position, Navigation, Timing)。各GNSS系统都建有独立的内部时间参考系统,称为系统时间或系统时GNSST。例如,美国GPS时间GPST,俄罗斯GLONASS系统时间GLONASST,欧洲Galileo系统时间GST以及我国北斗系统时间BDT。GNSST是整个系统运行协调一致、各卫星发射的导航信号精确同步的基础。目前,多数GNSS系统时间是连续运行的均匀原子时间尺度,以国际原子时为参考,不闰秒;只有俄罗斯GLONASS系统以协调世界时(UTC)为参考,与UTC协调一致进行插入闰秒的操作。卫星导航系统时间GNSST必须首先溯源至其国家标准时间UTC(k),其中k为国家守时实验室在国际原子时系统中的代号,通过UTC(k)与国际标准时间的常规比对实现其与国际标准时间的同步(溯源),以实现全球时间的同步和统一。国际电联ITU规定各国守时实验室保持的标准时间UTC(k)与国际标准时间UTC的差必须控制在 $\pm 100\text{ns}$ 以内,也就是说,UTC与各UTC(k)以及各UTC(k)间具有微小的偏差。同时,各GNSS系统建立时间不同,GNSST的起始时间及历元不同,这些都导致各GNSST间存在微小的时间差异,从而使得各导航系统发播的时间不尽相同。因此,GNSS系统时间的兼容和互操作问题,也是当前涉及GNSS的研究热点之一。

## 2 原子时及守时

### 2.1 从天文时到原子时

时间是目前所有物理量中实现测量精度最高的物理量，其他物理量的测量，如长度、电压等可以转为时间频率量后实现精密测量。

从古至今，时间的测量和定义是以天体测量的观测结果为基础的，由天体测量获得的时间称为世界时，也被形象地称为地球钟，即以测量地球自转周期为基础的时间测量方法<sup>[6]</sup>。直至现在，时间频率依然隶属于天体测量和天体力学学科。基于天体测量的天文时间曾经为人类社会活动和科学技术进步发挥了巨大的作用。但是由于地球自转周期并不稳定，UT 的测量精度不高，不能满足现代科学技术对高精密时间的需要，所以在 20 世纪 50 年代以后，出现了以量子物理学为基础的原子时间频率标准。1967 年 10 月，第十三届国际计量大会正式把由铯原子钟确定的原子秒长定义为国际标准秒长，取代了天文学秒长的定义。原子秒长规定为：位于海平面上的铯  $\text{Cs133}$  原子基态的两个超精细能级间在零磁场中跃迁振荡 9 192 631 770 个周期所持续的时间为一个原子时秒。当前，全球使用两套时间计量系统即原子时 TAI 和世界时 UT，国际法定标准时间——协调世界时 UTC 即是这两者综合协调的产物。

UTC 代表了两种时间尺度：国际原子时 TAI 和世界时 UT1 的结合，其采用原子时的秒长，而在时刻上尽量与 UT1 靠近。UTC 的定义为

$$\text{UTC}(t) - \text{TAI}(t) = N \text{ 秒} \quad (N \text{ 为整数}), \quad \text{UTC}(t) - \text{UT1}(t) < \pm x \text{ 秒} \quad (x < 1)$$

式中， $t$  为时刻， $N$  为“闰秒”数。最近一次闰秒调整是在 2016 年 12 月 31 日。现协调世界时 UTC 与国际原子时 TAI 的差为 37 秒，即  $\text{TAI} - \text{UTC} = 37$  秒，也就是 UTC 比 TAI 慢了 37 秒，它反映了地球自转长期变慢的趋势和程度。

### 2.2 协调世界时计算

协调世界时 UTC 是“纸面”时间，为了使用户能够获得实时、接近于 UTC 的物理时间信号，全球各地的时间中心参照国际标准时间 UTC 时间尺度的建立方式，利用原子钟建立各自的时间保持系统，通过建立本地时间系统与 UTC 的比对和溯源关系，获得稳定的地方协调世界时，一般记作 UTC(k)。而国际权度局（BIPM）整合这些实验室的原子钟的数据，利用加权平均算法计算得到国际原子时尺度，使其频率稳定度，准确度和可靠性好于钟组内单个钟所产生的原子时尺度。UTC 的产生计算流程如下：

(1) 全球归算，获得自由原子时（EAL）。利用全球参加 TAI 合作的 460 余台（截至 2017 年 9 月）原子钟加权平均，每台钟的权重主要依赖于该钟的长期稳定度性能，从而可以保证 EAL 的长期稳定性。

(2) 频率校准，实现国际原子时 TAI。BIPM 通过国际时间比对得到几个时间实验室的基准频标的频率（进行广义相对论和黑体辐射改正后）的加权平均，用于与 EAL 的频率进行比对，对 EAL 的频率进行校准而得到 TAI。

(3) 闰秒调整，获得协调世界时 UTC。BIPM 在计算得到 TAI 时，根据国际地球自

转服务（IERS）提供的 UT1 与 UTC 之差确定闰秒时刻，由此得到 UTC（见图 1）。

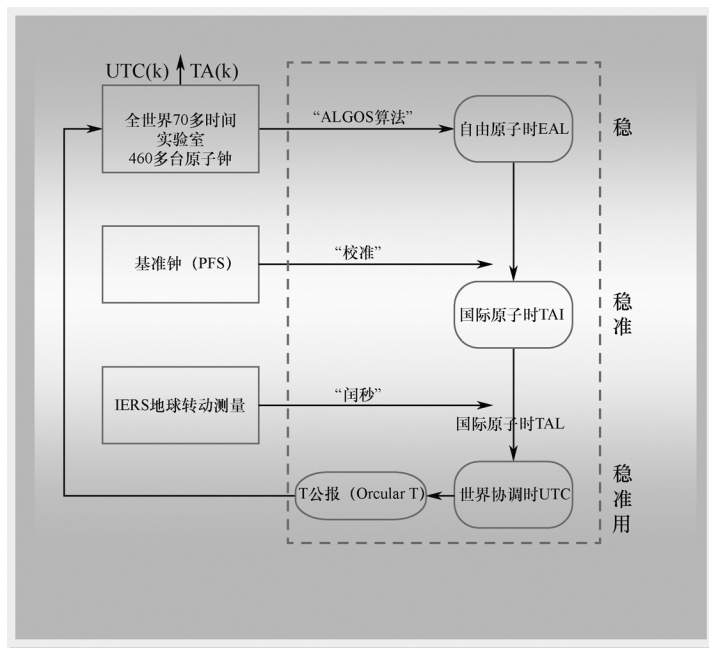


图 1 国际标准时间的产生流程

地方协调世界时 UTC (k) 通常由一个实际的钟输出，或者有频率修正，或者没有频率修正。它是各国时号发播的基础，UTC (k) 的产生和保持是各国时间实验室的首要任务。

### 2.3 我国时间基准 UTC (NTSC) 系统进展

我国陆基无线电长短波授时服务所依赖的时间基准系统 UTC (CSAO) 系统建成于 20 世纪 70 年代末，其缩写 CSAO 表示中国科学院陕西天文台，是中国科学院国家授时中心 (NTSC) 的前身。据 1980 年的国际时间局年报 (BIH1980) 记载，当年全球共有 45 个守时实验室参与国际原子时 TAI 和协调世界时 UTC 的归算和保持。当时，由中国科学院陕西天文台建立和保持的我国时间基准 UTC (CSAO) 系统由 3 台铯钟和两台国产氢钟组成，其原子钟差数据已经正式参与国际原子时 TAI 归算，国际时间连接采用 Loran-C 西北太平洋链 (9970-Y) 时号接收实现，UTC (CSAO) 与国际标准时间 UTC 的偏差通过 Loran-C 信号时间延迟计算获得。同时，早在 1987 年国际时间局年报 (BIH Annual report for 1987) 已经正式发布了我国综合原子时 TA (JATC) 的数据，当时 JATC 系统由包括中国科学院陕西天文台 CSAO、中国科学院上海天文台 SO、中国科学院北京天文台 BAO、中国科学院武汉物理所 WTO 以及北京无线电计量研究院 BIRM 的约 22 台各类原子钟共同归算，是最早实现原子钟资源共享、异地联合守时的典范。20 世纪 90 年代初，CSAO 在国内率先启用当时最先进的远距离时间比对技术——GPS 共视时间比对，当时 CSAO 的 GPS 共视比对数据被正式用于国际原子时 TAI 归算。

四十多年来，UTC（NTSC）连续、稳定、可靠运行并不断进步和发展，守时性能不断改进、作用不断拓展。目前 UTC（NTSC）是全球最重要的守时系统之一，对国际原子时归算的权重贡献连续多年排在全球前三位，为国际时间工作做出了重要贡献。同时，UTC（NTSC）为我国的授时服务工作做出了卓绝贡献，满足了我国各个时期战略导弹、卫星发射等国防军工任务、国民经济建设以及科学研究对精密时间的需要。进入新时期，随着我国北斗卫星导航系统的建设，UTC（NTSC）作为北斗时间的溯源参考和备份，为北斗系统的试验验证、性能评估以及建设和运行发挥了重要作用。

近二十年来我国标准时间的保持情况如图 2 所示。2016 年全球守时实验室对 TAI 归算的权重贡献如图 3 所示。

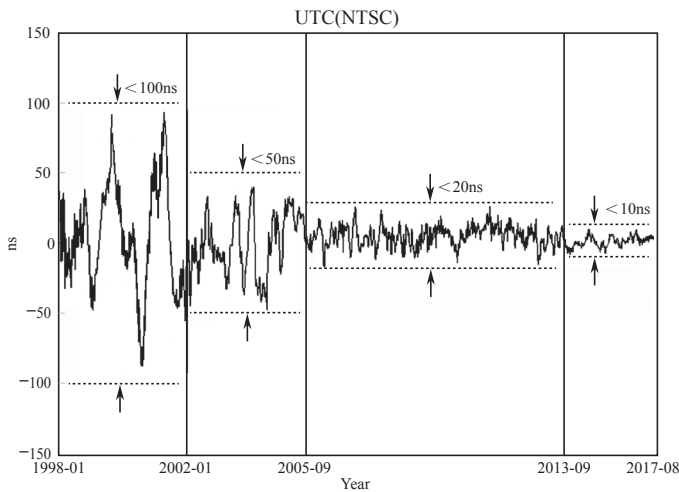


图 2 近二十年来我国标准时间的保持情况

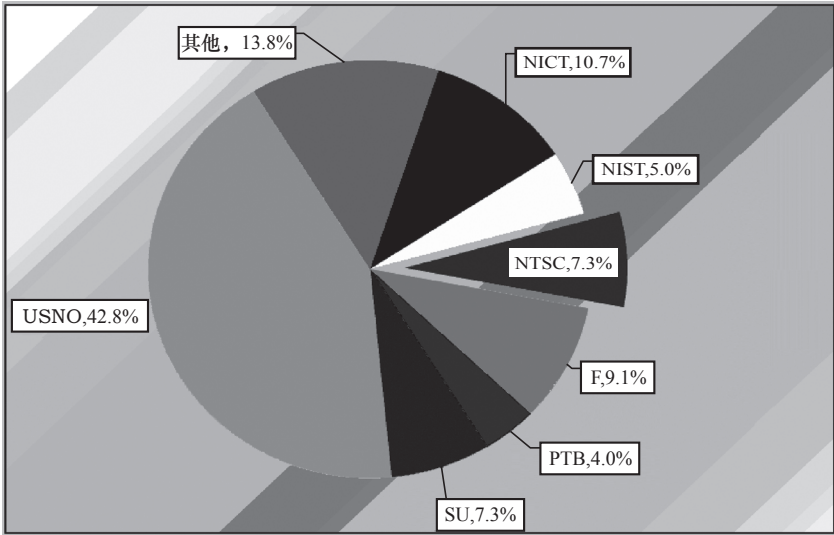


图 3 2016 年全球守时实验室对 TAI 归算的权重贡献



## 2.4 信息系统在守时中的应用

信息化和大数据是现代时间工作的重要特征。守时是产生和保持时间基准信号和信息的过程，它涉及原子钟组运行维护和管理、测量比对系统过程管理、原子时数据处理以及时间信息向授时发播台站和时间配送终端传送的过程，这其中的每个环节都是高度信息化、智能化和网络化的过程。

为使产生的时间尺度具有准确性和长期稳定性，通常需要对几个月、几年或更长时间的观测数据资料进行分析。当前，国际标准时间秒（原子时秒）的定义就是综合了地球自转上百年的观测数据而确定的。中国科学院国家授时中心作为我国授时服务的负责机构，为更好地提供授时服务，建立了地方原子时专业局域网、时频科学数据库和时频科学数据服务平台等信息化系统和设施。图4为NTSC地方原子时专业局域网的结构。

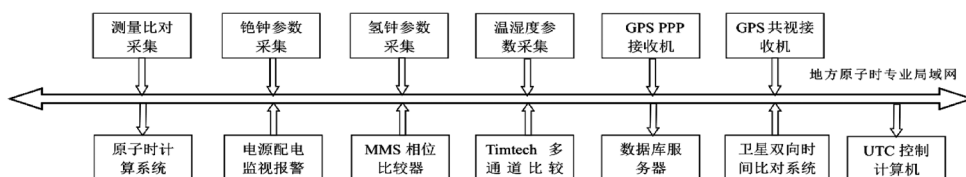


图4 NTSC地方原子时专业局域网的结构

鉴于科学数据在科学研究、社会进步中的作用，国内外科学机构和组织对科学数据库建设、科学数据共享和应用给予了越来越多的重视。中国科学院作为国内最具权威的自然科学研究机构，同样十分重视科学数据库的研究和建立。中国科学院1983年即提出“科学数据库及其信息系统”建设建议。时频科学数据库旨在将多年积累起来的重要时间频率数据和信息资源组织起来，与计算机技术、数据库技术以及网络技术相结合，为科学研究、国民经济建设、国防建设等提供支撑、共享与应用服务。国家授时中心负责建设和运行我国的时间频率科学数据库，时间频率科学数据库的内部组件及工作流程如图5所示。

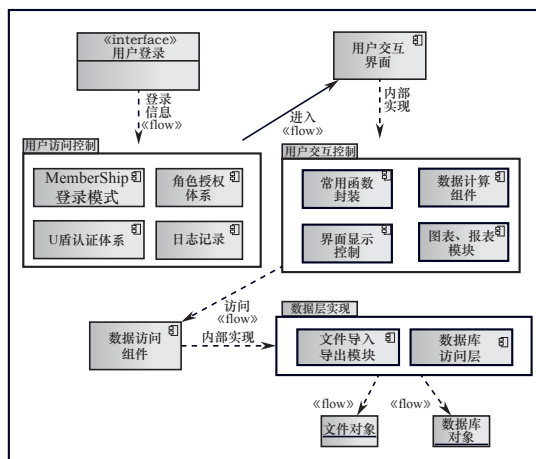


图5 时间频率科学数据库的内部组件及工作流程

该数据库的建立主要考虑到了登录权限、数据存储、程序计算、图形化显示和网络安全监控等几个方面的功能。图 6 给出了时间频率科学数据库中表现层、用户认证、数据服务、内部管理和底层模块五个部分的系统结构框图。图 7 为时间科学数据服务网络系统主界面。

表现层	Ajax页面无刷新模式		RIA富客户端技术
用户认证	基于角色的 用户权限管理	DES密码加密	UsbKey设备 高强度安全
数据 服务	原子钟状态数据	氢钟数据	铯钟数据
	比对数据	综合原子时 比对数据	地方原子时 比对数据
		卫星双向比对数据	GPS数据
	Bipm交互数据	原子时计算结果	原子钟速率
		原子钟权重	BIPM每月交互
	公报数据	地球自转公报	时间频率公报
内部 管理	设备管理	设备信息	设备状态
	用户管理	用户管理	科研机构管理
		角色管理	模块管理
		访问日志	操作日志
	系统配置	数据备份管理	运行状态管理
		系统参数配置	原子钟字典
		国家地区字典	数据字典
底层模块	文件导入导出模块	数据库访问模块	日志记录模块

图 6 时间频率科学数据库的系统结构框图



图 7 时间科学数据服务网络系统主界面

### 3 标准时间频率信号的发播和应用

#### 3.1 授时手段及其在各领域的应用

标准时间频率信号可以用多种手段通过电磁波在空间传播,直接被用户接收使用。现代授时技术主要包括长波、短波、低频时码、卫星、网络、电话和电视等。

现代陆基授时技术主要包括短波授时技术、基于罗兰 C 体制的长波授时技术、低频时码长波授时技术等。短波授时是最早利用无线电信号发射标准时间和标准频率信号的授时技术,其授时精度为毫秒量级。由于短波授时信号覆盖面广、发送设备简单、接收机价格低廉、使用方便,至今仍被许多国家所使用。基于罗兰 C 体制的长波授时具有传播稳定、延迟可精确预测的特点。该授时手段有地波和天波授时两种方式,其地波授时精确度优于 1 微秒,是目前唯一可达到微秒量级的陆基授时技术。低频时码授时技术是国际电信联盟 (ITU) 一直推荐的一项技术。它在低频频段工作,可同时以模拟和数字两种模式提供标准时间及频率信号。该技术由于充分利用微电子技术,使用户设备可以做得非常简单价廉,在多个领域得到了广泛的应用。

电话授时采用咨询方式向用户提供标准时间信号。用户通过调制解调器拨打授时系统的电话,授时系统主机收到用户计算机请求后,通过授时端调制解调器将标准时间信息 (时码) 发送给用户,完成授时服务。目前电话授时系统的定时精度为毫秒量级。网络授时是提供精确计算机网络时间服务的一种重要方法,实现计算机时钟同步于标准时间。网络授时基于网络时间协议 (NTP), 根据同步源和网络路径的不同,能够提供 1 ~ 50 毫秒的时间精确度。电视授时技术由模拟发展到现代的数字电视授时 (DTV)。数字电视授时技术是通过利用 DTV 信号进行单向测距来实现授时的。数字电视授时单向定时精度优于 60 纳秒左右,共视精度优于 10 纳秒。

卫星授时是覆盖范围最广、精度最高的授时手段。它一般是与定位功能联合处理的,其技术为接收机同时接收多颗卫星扩频信号并获得多个伪距测量值,获得实时卫星星历,通过导航定位方程解算得到用户位置信息和本地钟差信息,接收机再通过计算 GNSS 系统时与 UTC 时之差,将接收机时间溯源到 UTC 上,完成对接收机的实时授时功能。卫星授时具有比陆基无线电授时覆盖广、精度高的优点,这是因为一方面,卫星在高轨运行,一颗卫星就能覆盖地面很大一块区域,同时,卫星信号经过的路径比起陆基无线电相对单一,其时间延迟的变化相对较小。另一方面,地面上相距遥远的两地通过观察同一颗卫星,就可以实现远距离高精度时间比对。

精密时间在现代科学技术诸多领域都得到了广泛应用,如火箭发射、电子侦察等需要十亿分之一秒 (纳秒) 精度量级的时间,电力传输等则需要百万分之一秒 (微秒) 精度的时间。图 8 是我国标准时间信号在国家重要基础设施中的应用情况。不同应用对时间频率的准确度和稳定度有着不同的要求,如表 1 所示。

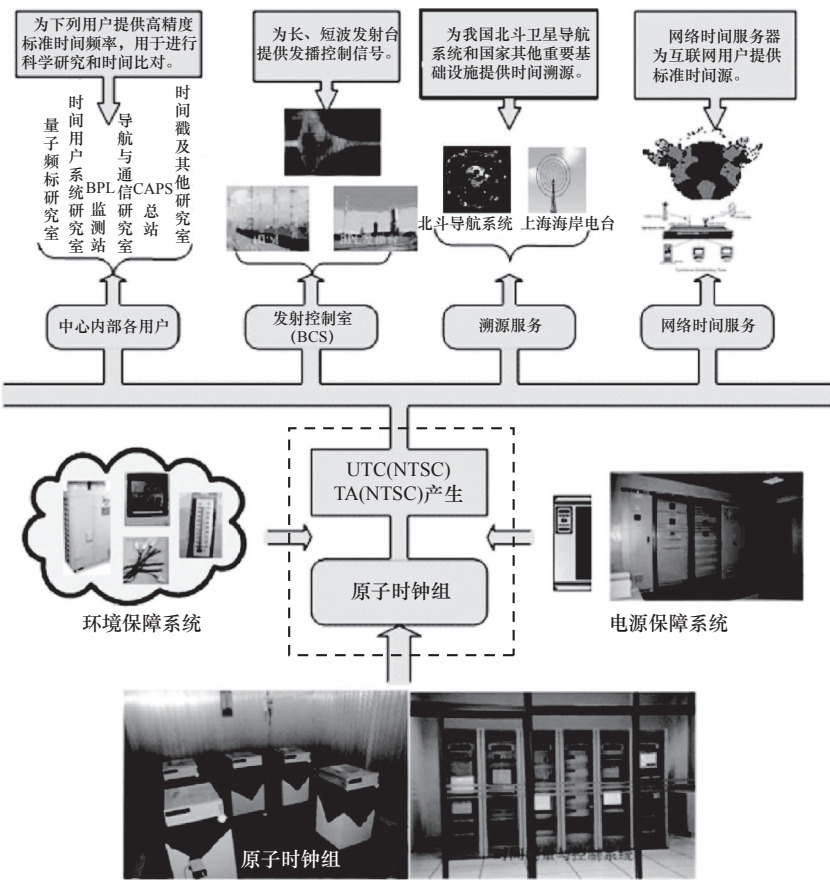


图 8 我国标准时间信号在国家重要基础设施中的应用情况

表 1 各种应用对时间频率的要求

	时刻准确度	频率稳定度
卫星导航	± 20 纳秒	± 2 × 10 <sup>-13</sup> (日稳)
电子侦察卫星	± 10 纳秒	± 5 × 10 <sup>-13</sup>
巡航导弹	± 50 纳秒	± 5 × 10 <sup>-13</sup>
卫星测轨	± 50 纳秒	± 1 × 10 <sup>-12</sup>
高速数字通信网	± 0.5 微秒	± 5 × 10 <sup>-12</sup>
电力传输网	± 1 微秒	± 1 × 10 <sup>-11</sup>
电视校频	—	± 5 × 10 <sup>-12</sup>

3.2 信息系统在授时中的应用

授时是将法定标准时频信号和信息传递给用户的过程。根据不同的应用需求，现代授时包括了星基、陆基、电话和网络授时等多种授时技术手段。信息化在授时服务中发挥着至关重要的作用。卫星授时是利用通信和导航卫星，通过空间无线电波实现高精度授时和传递服务的。它的授时信息产生在地面主控站，而主控站生成的各种时间信息通

过星地数据链上传卫星，再通过卫星将附加有精密时间信息的电文发播给用户。在地基无线电（长短波授时系统、海军长河2号系统）中，由于发射地的强磁场，时间基准及控制中心通常异地建设。为了授时数据的安全和可靠传输，控制中心与授时台站之间建有VPN等专网进行时间信号和信息的传输。电话和网络授时是以网络和通信系统为传输媒介实现授时服务的过程。图9是我国授时系统的信息化和网络化结构。

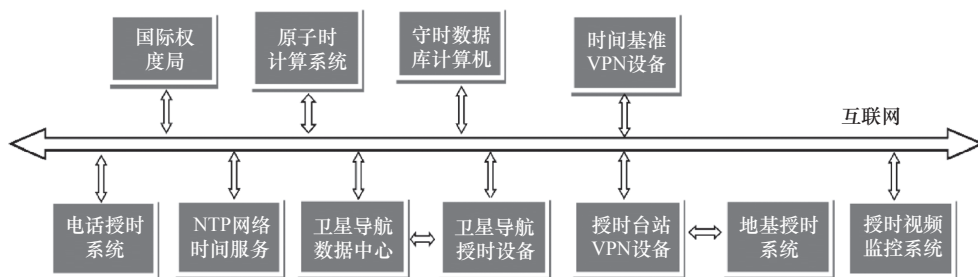


图9 我国授时系统的信息化和网络化结构

伴随着21世纪信息化时代的到来，对精密时间提出了越来越高的要求。物联网、智能交通、精准物流配送、高速数字通信、航天航空、重大科学实验和国防等都依赖于精密时间和时间同步。图10为我国天地一体授时信息化网络的未来规划。基准层产生标准时间频率信号和信息，支撑层包括星、地授时系统性能监测和环境监测等，系统层包括星基、地基无线电授时系统和各类增强系统。天地一体授时服务体系本身就是一个庞大的信息化系统，各部分之间建有各类网络和通信系统，以保障各环节间的实时、可靠通信和整个体系的可靠运行。

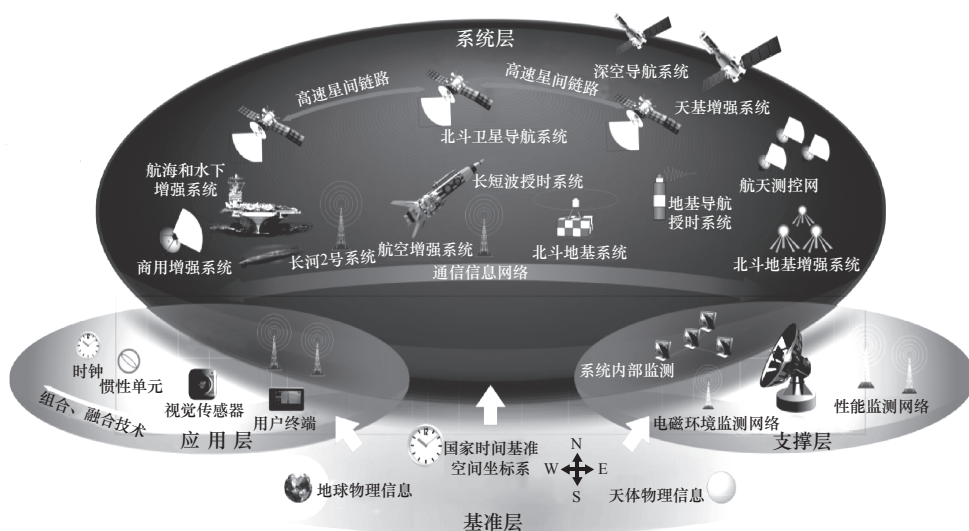


图10 我国天地一体授时信息化网络的未来规划



4 北斗时间系统

北斗二代卫星导航系统的建设分为 3 个阶段，从 2000 年至 2012 年的第一阶段被称为北斗验证阶段，在此阶段为中国及其周边用户提供卫星无线电定位服务和短报文服务。从 2012 年起，逐步实现亚太区域导航，卫星星座由 5 颗 GEO 卫星（58.75°E，80°E，110.5°E，140°E，160°E）、5 颗 55° 轨道倾角的 IGSO 以及 4 颗 MEO 卫星组成。第三阶段，北斗系统卫星将增加至 35 颗，其定位精度将优于 10m，授时精度将优于 20ns<sup>[7]</sup>。

北斗时是由北斗地面时间系统建立并保持的时间，简称 BDT，其溯源到中国科学院国家授时中心所保持的国家标准时间 UTC（NTSC）<sup>[8]</sup>。BDT 采用国际原子时秒长；以“周”和“周内秒”为单位连续计数，通过北斗导航电文发播；BDT 不闰秒，其历元为 2006 年 1 月 1 日（星期日）UTC 00h00m00s。BDT 从 2006 年开始启用与当时的 UTC 在整秒上一致之后，至今与 TAI 及 UTC 的差异为：

$[UTC-BDT] = -4\text{ s} + C2$ ， $[TAI-BDT] = 33\text{ s} + C2$

C2 是 BDT 时间与 UTC 在秒小数上的差异（C2 暂未在国际上公布）。

北斗时 BDT 国际溯源关系如图 11 所示。

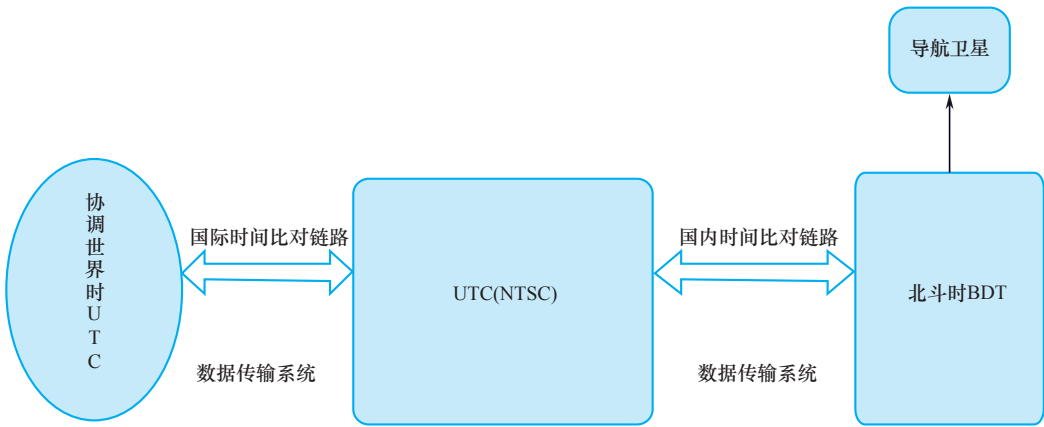


图 11 北斗时 BDT 国际溯源关系

北斗系统时间 BDT 由综合获得的“纸面时”实现，通过主控站的主钟产生和保持。用于守时的原子钟主要以氢原子钟为主，包括部分铯原子钟，钟组的规模在 10 台以上。系统时间计算的算法通过优化形成性能良好的纸面时，算法中充分考虑了原子钟自由运行的频率偏差、频率漂移以及频率稳定性。原子时的取权方式主要采用扣除钟斜率的 Allan 方差和最大权限制。北斗系统为了尽量和 UTC 保持一致，采用频率驾驭的方式在适当的时候调整该偏差，该调整量的将不大于 5E-15。

## 5 中俄卫星导航系统时间国际合作

随着全球多个卫星导航系统的发展和应用, GNSS 兼容互操作成为重要议题之一。多个卫星导航系统同时工作时, 彼此间会产生干扰, 从而影响导航和授时性能, 兼容互操作将使多个导航系统融合共用, 使用户通过使用多个卫星导航系统信号, 实现比单独使用一个系统信号更好的服务, 而不显著增加使用成本。开展 GNSS 时间兼容互操作可以更好地发挥 GNSS 系统的精密授时功能, 实现时间的国际协调和统一。基于我国时间基准 UTC (NTSC) 系统, 开展中俄、中欧、中美 GNSS 时间合作, 能为我国北斗系统与其他 GNSS 系统兼容互用提供重要技术支撑。而在 GNSS 时间系统国际兼容互操作中, 我国北斗和俄罗斯格洛纳斯时间互操作又是北斗系统国际时间合作的重中之重, 因为美国 GPS 和欧洲 Galileo 系统时间的双边兼容互操作合作已经进行了多年, 中俄为了推动和发展各自的全球卫星导航系统就必须携起手来, 合作共赢。

授时系统和卫星导航系统都是国家重要的基础设施。2014 年 9 月 11 日, 国家主席习近平在杜尚别会见俄罗斯总统普京, 在谈到两国战略性大项目合作时特别强调“卫星导航系统合作已经启动”, 两国领导人的重视充分说明卫星导航战略合作的重要性。2015 年 1 月 27 日, 中俄双方在北京召开了中俄卫星导航战略合作第一次项委会会议, 正式签署了合作协议, 明确了以中俄时间合作为切入点开展两国卫星导航务实合作。

中国和俄罗斯都是国际原子时系统的重要成员, 其中, 俄罗斯国家标准时间 UTC (SU) 是格洛纳斯卫星导航系统时间的溯源参考, UTC (NTSC) 是北斗系统的溯源参考。推动中俄之间开展时间国际合作, 对于维护时间的战略地位、实现 GNSS 系统时间兼容和操作具有重要战略意义。中俄卫星导航战略合作是两国元首共同倡导的大国合作的重要内容。国家授时中心代表我国北斗, 积极开展 GNSS 时间系统的国际合作, 特别是中俄 GNSS 时间国际合作已经取得重要进展。按照中俄卫星导航国际合作项委会以及中俄兼容互操作组多次会议会谈纪要, 务实推进, 开展了卓有成效的工作: ①完成了 UTC (NTSC) 和 UTC (SU) 间常规国际时间比对链路的建立; ②制定了数据交换规范, 完成了专用数据交换 FTP 网站的建立; ③开展了 GLONASS 和 BDT 时差联合计算。UTC (NTSC) 与 UTC (SU) 间国际合作将为我国北斗和俄罗斯格洛纳斯系统兼容互操作提供必要的技术支撑。

## 6 基于北斗的欧亚国际时间比对

随着北斗系统的建设和发展, 为拓展北斗应用, 中国科学院国家授时中心基于我国时间基准 UTC (NTSC) 系统, 采用北斗共视 (CV) 法, 通过与德国物理技术研究院所保持的德国国家标准时间 UTC (PTB)、瑞典国家技术研究中心保持的瑞典国家标准时间 UTC (SP)、比利时皇家天文台保持的比利时国家标准时间 UTC (ORB) 以及西班牙海军天文台保持的西班牙国家标准时间 UTC (ROA) 分别进行比对试验, 实现了 2 ~ 4 纳秒的比对精度。在北斗系统星座还不完善的情况下 (目前在欧洲只能观测到四

颗左右北斗卫星），其远距离比对性能指标与美国 GPS 系统相当。亚欧国际时间比对的完成，为北斗比对正式纳入国际原子时 TAI 归算比对链路做了技术准备，对于北斗走向国际拓展应用具有重要价值和里程碑意义。表 2 是 2017 年 NTSC 与欧洲 4 个主要守时实验室的北斗国际共视比对结果。

表 2 基于北斗的中欧共视时间比对初步结果

链路	比对方法	标准差（纳秒）
中国—德国	北斗共视	2.25
中国—瑞典	北斗共视	2.90
中国—比利时	北斗共视	2.03
中国—西班牙	北斗共视	4.06

7 总结与展望

2016 年 6 月，国务院发布《中国北斗卫星导航系统白皮书》，概括了我国北斗卫星导航系统的三步走发展轨迹：2000 年年底建成北斗一号系统，向中国提供服务；2012 年年底，建成北斗二号验证系统，向亚太地区提供服务；2020 年前后，建成北斗全球系统，向全球提供服务。目前，国家已决定加快北斗全球系统的建设速度，2018 年前后将初步具备提供全球服务的能力，满足“一带一路”发展需求。为了达到全球服务的目标，北斗在轨组网卫星需要达到 35 颗，未来 2～3 年，我国还将密集发射 10 颗以上北斗导航卫星。届时，北斗系统将为全球用户提供全天候、全天时、高精度的定位、导航和授时服务，成为真正的全球化产品。

随着北斗系统的建成，其在授时服务领域将发挥越来越大的作用。除了满足我国国防全球战略和国民经济建设需要外，也将在国际时间合作及全球时间统一中发挥举足轻重的作用。中国科学院国家授时中心将在北斗时间系统的建设、发展及拓展应用中继续发挥引领作用，这将更加需要推广信息化在时间领域中的应用。

参 考 文 献

[1] 董绍武, 屈俐俐, 袁海波, 等. NTSC 守时工作：国际先进、贡献卓绝 [J]. 时间频率学报, 2016,39(3):129-137.

[2] Gianna Panfilo. The coordinated universal time[J]. IEEE instrumentation&measurement magazine , 2016,19(3) :28-33.

[3] S.L. Campbell, R.B. Hutson, G.E. Marti, et al. A Fermi-degenerate three-dimensional optical lattice clock[J]. Science, 2017, 358(6359): 90-94.

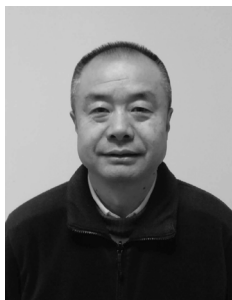
[4] 武文俊, 张虹, 广伟, 等. 利用 AM22 进行国际卫星双向时间传递 [J]. 时间频率学报, 2017, 40(3):155-160.

[5] Shaowu Dong, Haitao Wu, Xiaohui Li, et al. The Compass and its time reference system[J]. Metrologia,

2008, 45(6):S47-S50.

- [6] 董伊雯. 时间与全球卫星导航 [J]. 现代导航, 2015, 2:150-152.
- [7] 杨元喜, 李金龙, 王爱兵, 等. 北斗区域卫星导航系统基本导航定位性能初步评估 [J]. 中国科学 :2014, 44(1):72-81.
- [8] 北斗卫星导航系统空间信号接口控制文件 [Z]. 北京: 中国卫星导航系统管理办公室, 2017.

### 作者简介



董绍武, 1963 年 2 月出生, 中共党员, 理学博士, 中国科学院国家授时中心时间基准室主任, 研究员, 博士生导师。主要从事标准时间产生和保持(守时)技术、GNSS 时间等方面的研究工作。获中国科学院、陕西省科学院、原总装备部等科技成果奖励多项; 获 2008 年中国科学院王宽诚西部学者突出贡献奖、2014 年度享受国务院政府特殊津贴专家等奖励; 在 Metrologia 等国内外学术刊物上发表学术论文 30 余篇。为国际电联 ITU-R/WP7A 国内对口工作组组长、中俄卫星导航时间兼容互操作子工作组组长。

## 开放科学数据 加速科技创新

黎建辉 张丽丽 温亮明

(中国科学院计算机网络信息中心)

### 摘要

科学数据是科学发现和知识创新的重要依据和基石，在大数据时代，其丰富程度及从中萃取出信息和知识的能力成为国家科研竞争力的重要决定因素。

本文首先对科学数据的特征与范围、开放共享的必要性进行了概述，并介绍了当前科学数据发展的有关现状和态势。其次，重点分析了我国科学数据共享服务情况，总结了我国科学数据开放共享与应用呈现出的多模式特点，结合案例说明了科学数据共享对科研及经济、社会发展的作用，提出我国在数据开放水平和共享服务能力方面存在的问题。最后，结合我国科学数据管理和开放共享现状，对比国内外科学数据资源管理和开放共享的有关现状和趋势，提出推动我国科学数据发展的建议。

### 关键词

科学数据；大数据；数据开放；数据共享；科技创新

### Abstract

Scientific data is the key resource for scientific discovery and knowledge innovation. In the era of Big Data, its richness and ability to extract information and knowledge have become an important determinant of national innovation competitiveness. This article summarizes the characteristics and scope of scientific data, the necessary of open data. Then, we will focus on analyzing the scientific data sharing practices in china, summarizing the multi-model features of the open scientific data, and illustrating the role of scientific data sharing on scientific research and economic and social development based on typical cases. Finally, we compared the current situation and trend of scientific data curation and sharing between our country and the other countries, and give some suggestions to push forward open scientific data in china.

### Keywords

Scientific Data; Big Data; Open Data; Data Sharing; Discovery and Innovation

## 1 科学数据及其开放共享的内涵

### 1.1 科学数据

科学数据是人类社会科技活动中所产生的以科学证据形式存在的基本数据、资料以及系统加工而成的数据产品和相关信息<sup>[1]</sup>，在来源上包括数字化观测、科学监测等来自仪器设备或传感器的数据，计算模拟与模型输出的数据，对情景或现象的描述数据，对行为的观测或定性描述数据，用于管理或者商业目的统计数据，以及对它们进行加工处



理所产生的数据。科学数据被认为是证实或者证伪科学发现或科学观点的事实、证据或者论证推理的基础,既是科学研究不可或缺的组成部分,又是科技创新活动中最基本的要素,还是科技创新、经济发展和国家安全的重要对象与条件,具有明显的潜在价值和开发价值,是信息时代最基本、最活跃且影响面最宽的科技资源,对国家科技发展有重要意义<sup>[2]</sup>。

## 1.2 数据开放共享

目前尚未有科学数据开放共享的相关定义,借鉴数据开放的相关概念<sup>[3]</sup>,本文对科学数据开放共享做如下定义:科学数据开放共享就是指数据生产者将所拥有的科学数据通过多种形式公开发布,供其他科研工作者免费获取、重用,从而实现数据资源的最大化利用。科学数据被开放共享有一定的理论依据<sup>[4]</sup>:其一,科学数据是科技活动长期积累的一种科技资源,其具有特殊的排他属性,具有明显的潜在价值并且可以在应用中不断增值;其二,任何个人或单个组织的能力有限,为了适应当代基于海量科学数据的科研发展趋势,必须借助他人的科学数据;其三,国家投资的科学数据共享是对纳税人纳税义务的一种补偿,信息公开是政府应当对公众承担的一项法定职责。此外,还有学者提出了科学数据共享的4个理由<sup>[5]</sup>:进行研究再现或验证,使公共资助研究的结果被公众所用,使其他人利用现有数据提出新的科学问题,提升研究和创新水平。

为了促进科学数据的有效开放共享,Force11 提出了一套科学数据管理准则——FAIR 原则,该原则建议所有科研产出的数据在存储和管理时应该努力达到以下标准<sup>[6,7]</sup>:① Findable (易发现):用丰富的元数据描述数据集,每一组数据都被指定一个唯一且永久的标识符,科研人员和计算机可以通过元数据检索到特定的数据集;② Accessible (可访问):数据应该长期存储,使用者在任意时间内可以通过标准化的通信协议规定的标识符容易地访问或下载数据;③ Interoperable (互操作):数据使用正式的、可访问的、共享和广泛适用的语言来表示,数据内部引用的其他数据可以链接到其他数据集合中;④ Reusable (可重用):数据应该有一个明确且可访问的使用许可权限,满足不同领域的行业标准,后续研究时可以继续使用。目前,FAIR 原则已经被不同的相关利益者共同设计和认可,成为数据管理的国际准则,欧洲议会已遵循 FAIR 原则率先开放了科学云<sup>[8]</sup>。

## 2 科学数据开放共享的模式

所谓共享模式是指科学数据共享活动中逐步形成并适应当前共享工作需要的普遍范式,按照不同的分类方法可以划分出不同的共享模式。结合国内外主流数据共享实践中的数据源头、数据管理开放特征等维度,将现阶段众多科学数据资源开放活动大致区分为以下几种模式。

### 2.1 大科学装置模式

大科学装置是指通过较大规模投入和工程建设来完成,建成后通过长期稳定的运行

和持续的科学技术活动来实现重要科学技术目标的大型设施<sup>[9]</sup>, 500 米口径球面射电望远镜 (FAST)、北京正负电子对撞机 (BEPC)、中国散列中子源 (CSNS) 等都是典型的大科学装置。大科学装置是现代科技诸多领域取得重大突破的必要条件, 以大科学装置为代表的大型仪器设备及工程投入, 源源不断地生产和捕获超大规模数据资源以支持长期持续的科学技术活动, 许多前沿领域的重大突破都离不开大科学装置<sup>[10]</sup>。大科学装置模式所代表的就是一类以高度集中的大规模、高投入精尖设备为标志, 以规模化数据生产与规范化数据开放见长的数据资源共享活动。根据大科学装置中数据生产周期, 可以将其数据共享类型分为即时共享和延时共享两种: ①即时共享, 大科学装置所生产的数据经过必要的标准化处理后立即进入开放平台, 服务社会科研工作, 并无项目内部有计划和目的的数据开放延迟; ②延时共享模式, 数据生产首先满足项目组内部的科研需要, 数据资源通过分门别类 (如数据分级) 后, 有选择、有目的、有计划地向社会公众与科研逐步开放。

## 2.2 监测网络模式

与大科学装置相对集中、单源的数据捕获与高度统一的数据管理与开放活动有所区别, 监测网络模式中, 参与数据资源收割、开放与服务的节点既相互连接, 又自成体系。国家生态系统观测研究网络 (CNERN) 就是在现有的分布于全国的观测研究台站的基础上提供涵盖农田、森林、草地荒漠等多种生态类型的数据<sup>[11]</sup>。通过对各场地、样品标本、观测仪器设备、观测研究试验数据等资源信息的整合和规范化, 有效地构建起国家生态系统观测和研究的野外基地、数据资源共享平台。为了方便用户获取数据, 该网络建立了分布式的野外台站——综合中心二级服务体系, 用户既可以访问总中心资源服务网站, 也可以访问各野外台站网站。资源服务网站展示了各野外台站、综合中心的资源信息、资源实体, 不同类型的资源提供不同的服务方式, 实物资源实行在线申请、在线审批、线下服务的服务模式, 数据资源实行在线下载、在线订单申请、在线订单跟踪、在线传送数据的服务模式, 专题服务、示范模式在网站上均作了介绍和宣传, 各野外台站、综合中心也公布了自己的资源共享目录和联系方式。

## 2.3 开放平台服务模式

当前以数据为中心的科学研究需要运用大数据技术和工具进行数据分析和处理, 科学数据平台在数据开放性、数据融合能力、数据跨地域传输与共享等方面的特点为海量数据的存储和处理方面提供了方便<sup>[12]</sup>, 越来越多的科学数据开放平台被建立并提供数据公共访问获取服务, 比较典型的平台有中国科学院的中国科技云、北京大学的开放研究数据平台、哈佛大学的 Dataverse 等。以北京大学开放研究数据平台为例, 该平台包含了来自北京大学中国国情研究中心、北京大学数据与信息管理学组、北京大学地理信息系统软件实验室、北京大学生命科学学院生物信息学中心等 14 个数据空间的 73 个高质量数据集, 共 252 个数据文件<sup>[13]</sup>。平台支持从界面到信息内容的完整双语展示, 既为研究者提供研究数据的管理、发布、存储和使用追踪服务, 为数据集分配 DOI 永久标识符并设立数据访问控制、请求与审核机制, 也为用户提供研究数据的浏览、检

索、在线分析和可视化、下载流程中嵌入版权和使用协议等。目前北京大学开放研究数据平台已经加入 Dataverse 仓储地图,并在 re3data.org 中注册,2015 年第 15 届中国经济学年会 CFPS 专场、CHARLS 专场均对平台进行了介绍和宣传。

## 2.4 联邦服务模式

在面向科学应用的数据集成检索系统中,用户需要能够从多个自治的集成数据源中灵活地进行检索并获得数据,所以需要利用统一检索平台以及信息源链接来检索信息资源,这就是数据联邦<sup>[14]</sup>。这种服务多以松散的联盟形式存在,不同节点的数据资源和技术条件平台保障多源数据的同步收录,国家科技基础条件平台就是联邦服务的典型例子。以国家科技基础条件平台之一的国家地球系统科学数据共享服务平台(Data Sharing Network of Earth System Science, DSNESS)为例,其由总中心和分布于全国的 7 个学科数据中心、8 个区域数据中心、8 个资源点共同组成。平台接受成员和其他数据拥有者提供的相关科学数据,经审核后对外发布和共享;平台不定期发布数据需求信息,通过合作研究实现数据融合、加工和增值;平台通过建立镜像、数据交换等形式,引进和吸收国外数据资源并提供共享。截至 2014 年年底,平台共收集数据资源 59.56TB,涉及地球系统科学相关的 5 个一级类和 29 个二级类,平台注册用户已超过 94 000 人,访问量超过 1 800 万人次,向科技届和社会公众提供数据 93.53TB,为 2 300 多项重大科研项目提供了有效的数据服务<sup>[15]</sup>。

## 2.5 数据出版模式

数据出版指学术期刊、学术机构或学术社区等相关主体将科研工作者产生的科学数据及相关信息进行评议、编辑加工,使之符合一定规范和标准并能为学术界方便地获取及再利用和引用的过程<sup>[16]</sup>。按照数据与论文的关系可以将数据出版划分为三种形式<sup>[17]</sup>: ①数据附属于出版物:将研究数据作为论文的附件与论文一起出版,这是脱胎于传统的论文出版模式,在这种模式下,数据并不独立,仅限于与已经发表的期刊论文相关的部分。②独立的数据出版:凭借数据论文等形式,依托出版渠道将研究数据作为研究成果进行出版,另辟蹊径实现数据的可发现、可访问、可理解和可重用,如《中国数据科学》《全球变化科学研究数据出版系统》《Nature Scientific Data》等期刊就是通过发表多领域的科学数据论文来推动科学数据的开放共享与规范引用,促进科学数据的可发现。③数据独立存储:将研究数据作为独立的部分存储在研究数据知识库中,在论文出版时必须把数据提交到相关数据存储库中,通过数据描述符或引用建立与论文的管理,每份数据都会分配到一个可长期使用的标识符号(如 DIO、URN 等)。

除了以上提出的五种科学数据共享模式之外,我们还梳理出其他多种共享模式<sup>[18]</sup>,如表 1 所示。

此外,还有学者依据开放实践路径提出了自上而下、纵横联合、自下而上的模式<sup>[19]</sup>。当然,科学数据开放共享的模式不能一概而论,不同的学科、组织或国家采用的机制、模式均不相同,不同的共享模式意味着不同的驱动机制、权责关系以及不同的管理方式与质量绩效等,各种分类之间也存在一定交叉重叠,共享实践通常是多种模式自治的综

合体。

表 1 科学数据开放共享的其他模式

分类角度		具体模式
一般共享模式	科学数据来源	专业化生产模式、联合共建共享模式、数据交换模式
	技术应用	基于完全开放数据库、基于查询接口、基于元数据、基于开放网格服务架构数据集成
	科学数据权益性质	公益性、商业化
	政策运动	金色道路、绿色道路
	协议工具	“知识共享”协议、“数字对象标识符”
特定领域共享模式	气象领域	后台管理模式
	公共卫生领域	权限管理
	基因和临床领域	GA4GH
	地理系统科学领域	地理网络共享模式、设施即服务模式、数据资源即服务模式、数据功能即服务模式
	个人隐私数据	充裕模式、安全港模式、标准合同模式、问责模式
其他共享模式	基于系统架构	点对点模式、星形模式、总线形模式
	基于数据组织	集中式模式、分布式模式
	基于政府部门	垂直模式、水平模式、交叉模式

3 国内外科学数据共享实践成效

3.1 国际科学数据开放共享新进展

科学数据开放共享的范围和参与程度正在逐步扩展，影响范围也在逐步拓宽，从科学研究到经济发展，从开放科学数据到开放科学。近 5 年来，国际社会在科学数据开放共享方面进行了众多实践，在多个领域取得了新进展<sup>[20]</sup>。

3.1.1 多领域关注科学数据

科学研究的跨学科发展以及科学数据的跨领域交融，带来了多领域对科学数据的关注。①跨领域战略合作：2012 年 7 月，欧盟委员会宣布将在地平线 2020 计划战略的部分领域开展科学数据开放共享试验<sup>[21]</sup>；2013 年 6 月，八国集团首脑签署《开放数据宪章》。②科研机构的重视：2013 年 12 月，欧洲研究型大学联盟发布《科学数据路线图》；2014 年 8 月，联合国成立“可持续发展数据革命独立专家顾问小组”。③科研资助机构的支持：欧洲科学基金组织、经济合作组织、美国国家科学基金会、英国皇家科学院等科研资助和管理机构要求受资助人公开原始科学数据<sup>[22]</sup>。④图书情报领域的关注：联机计算机中心在 2013 年发布了大学科学数据管理政策调研报告；2015 年 10 月，美国图书信息资源委员会与数字图书馆联盟联合设立科学数据管理相



关项目。

### 3.1.2 科学数据管理部门相继成立

伴随着科学数据开放共享,产生了大批专门从事科学数据管理的机构或组织:①科学数据组织涌现:欧盟委员会、美国国家卫生基金会、美国国家标准与技术研究院、澳大利亚创新部等共同建立了科学数据联盟;英国联合信息系统委员会支持组建了数据管理中心;美国还出现了专门针对特定领域的非营利组织——开放数据基金。②图书馆设立科学数据管理部门:大学与研究图书馆协会成立了数字人文科学数据管理研究所;牛津大学图书馆、加利福尼亚大学图书馆成立了专门的科学数据管理工作组;欧洲科研图书馆联盟成立了学术交流与基础设施指导委员会,专门探索出版物与科学数据之间的关联。

### 3.1.3 多领域实施科学数据共享项目

随着科学数据的价值被不断认可,科学数据共享的需求日趋显现,科学数据共享项目数量也在迅速增加。①对科学数据共享大力投入:2014年,美国国立卫生研究院宣布启动生物医学数据分析和利用战略并投资3 200万美元;大气投资基金的大气弹性试点项目提供了1亿美元供用户开展加勒比海岸区域数据共享。②基金资助科学数据共享项目:美国国家卫生基金会资助地球数据观测网项目,以实现的科学数据保存、获取和复用;2013年1月,丹麦电子研究图书馆等5个科学资助机构共同设立知识交换项目,用于高等教育和科研领域开放科学数字化基础设施建设。③重视科学数据共享推广:戈登-贝蒂·摩尔基金会发布了《数据共享哲学》文件,以便开展科学数据共享的理论依据和推广理念;2014年,日本工业标准调查会出版《数据共享与管理的价值与影响》,从多方面阐述科学数据共享的经济效益。

### 3.1.4 图书馆界开展数据管理服务

图书馆界特别是图书管理机构、高校和科研院所图书馆积极参与科学数据的管理和共享。①对科学数据管理的认同提升:2014年6月,大学与研究图书馆协会发布了《大学图书馆最新趋势》报告,认为科学数据已经成为高校图书馆领域最关注的热点趋势之一<sup>[23]</sup>;新媒体联盟发布的《地平线报告:2014图书馆版》指出许多专家都认为出版物的科学数据管理对图书馆越来越重要<sup>[24]</sup>。②开展科学数据管理服务:联机计算机图书馆中心在2013年发布的高校科学数据管理政策研究报告中呼吁高校制定科学数据管理政策;2013年,美国研究图书馆协会也制定了指南来推动科学数据管理过程标准化。

从国际科学数据开放共享实践来看,国外已经将科学数据共享提升到了战略高度,在政策、资金等方面对科学数据共享大力支持。此外,国外还比较注重不同地区、不同领域之间的合作交流,全社会营造出良好的科学氛围来提升科研人员对科学数据共享的认可程度。围绕这些实践,国外学者进行了一些理论探索,学术成果主要集中在科学数据共享的动力与阻碍因素<sup>[25]</sup>、数据共享参与主体的行为分析<sup>[26]</sup>、数据共享政策法规解读<sup>[27]</sup>、数据共享技术障碍分析<sup>[28]</sup>等方面。



### 3.2 我国在科学数据开放共享中的实践

与国外相比,我国在科学数据开放共享研究方面比较注重对国外共享成果进行综述和引入,主要包括科学数据共享平台调查分析<sup>[29]</sup>、数据共享政策调研<sup>[30]</sup>、数据共享行为影响因素分析<sup>[31]</sup>等,还有在此基础上对我国科学数据共享的影响因素<sup>[32]</sup>、共享模型<sup>[33]</sup>、关键技术<sup>[34]</sup>等的探讨。我国虽然起步稍晚,但在科学数据共享实践方面发展迅速,以中国科学院为代表的中国科研力量在科学数据共享方面积极探索,为科学技术创新和社会发展做出了重要贡献。

#### 3.2.1 中国科学院数据共享工程建设情况

作为中国科技的“国家队”和国家战略科技力量的中国科学院高度重视数据科学在科研发现和信息化建设中的创新与应用,率先开启了数据共享工程(建设历程如图1所示),为中国科学院乃至全国科技界的科学数据共享做出了重要贡献<sup>[35]</sup>。

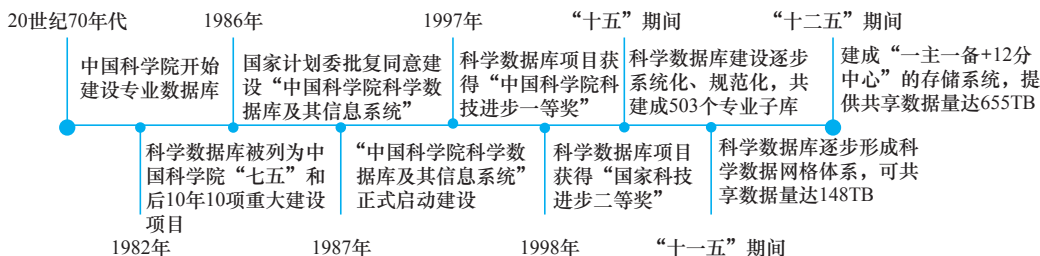


图1 中国科学院数据共享工程建设历程

经过40余年的发展,建成的科学数据库整合多领域资源,形成了支持科研活动与科技创新的科学数据云环境,完成了13个领域重点库、7个所级重点库、20个专业库数据资源的整合与集成,建成了存储容量达52PB的分布式的海量存储环境。基于科学数据与文献关联服务和海量科学数据分析可视化关键技术研究与应用示范的成功探索,具有为用户提供强大的科学数据与文献互联、丰富的可视化展示等功能<sup>[36]</sup>。

#### 3.2.2 中国科学院数据云应用典型案例

“十二五”期间,中国科学院数据云服务平台的建成进一步释放了我国科学数据的价值,为“一带一路”布局、生态文明建设、科学前沿探索、科研范式革新、社会民生保障等国家战略需求及学科发展提供了有力的数据支撑与科学技术应用服务<sup>[37]</sup>。

(1) 照亮“一带一路”。“一带一路”涉及东亚、西亚、南亚、中亚、中东欧等地区的65个国家和地区,多数国家急需科学技术来支撑发展。中国科学院依托技术、资源、人才优势,为“一带一路”建设贡献着中国力量:中国科学院海洋研究所整合了包括观测浮标、航次调查、国内历史资料等多源数据,形成了海洋立体综合数据集,组成了长期连续的数据观测研究网络,为保障海上丝绸之路正常运行提供了基础海洋环境数据。中国科学院发展中国家科学院生物技术卓越中心完成的《“一带一路”沿线国家生物技术的发展报告》分析了“一带一路”沿线国家在生物技术领域的专利技术研发和国际专利布局情况,为沿线国家生物技术的发展提供了理论支撑<sup>[38]</sup>。中国科学院地理科学与

资源研究所提出的“丝绸之路经济带”智库网络与协同平台一体化支撑框架涵盖了智库网络、科研环境、决策支持系统和国际合作计划等内容，可长期有效支撑“一带一路”沿线国家建设和发展<sup>[39]</sup>。

(2) 助推生态文明。我国生态系统类型丰富多样，但由于生态环境脆弱，生物多样性受到严重破坏，生态环境问题已经成为我国社会发展过程中面临的严峻挑战。中国生态系统评估与生态安全数据库，在长江流域生态健康评估、北京市生态保护红线规划研究、内蒙古阿尔山市生态系统生态总值核算等重大决策中提供了数据支撑<sup>[40]</sup>。围绕热带海洋环境与资源两个重大研究方向，中国科学院南海海洋研究所建成的南海海洋科学数据库支撑了我国海洋科技创新、海洋经济发展和海洋权益维护<sup>[41]</sup>。中国科学院南京地理与湖泊研究所承建的“中国湖泊科学数据库”为国家863计划“基于碳卫星的遥感定量监测应用技术研究”提供了基础数据，为高分重大专项“环境保护遥感动态监测信息服务系统”提供了序列卫星影像数据<sup>[42]</sup>。

(3) 激活科学前沿。数据的爆炸式增长把科学研究的各个领域和环节推到了一个前所未有的“大数据”时代，中国科学院数据云在助推我国科学研究占领国际前沿阵地中发挥着越来越重要的作用。中国科学院高能物理研究所联合中美亚欧等国家和地区开展了大亚湾反应堆中微子实验，精确测量中微子混合角 $\theta_{13}$ ，研究成果入选 Science 杂志“2012年度十大科学突破”<sup>[43]</sup>；2015年，合作组将 $\theta_{13}$ 和中微子质量平方差的测量精度提高了近一倍，为世界最高精度<sup>[44]</sup>。中国科学院昆明植物研究所提出的“iFlora 研究计划”，整合现有的多个优势学科力量，通过多学科交叉实现植物物种多样性研究的标准化、信息化和动态化，开辟了后植物分类学的新时代，未来将会提供植物物种鉴定、植物学科学大数据、公众科普认知教育、生物多样性保护与开发决策支持等服务<sup>[45]</sup>。

(4) 孕育科研范式。大数据作为改变人类生活及理解世界的新方式，正驱动着科学研究范式的转化，科学大数据已成为科学发现和知识创新的新引擎，郭华东院士指出，人类已经进入了“大数据+大科学=大发现”的时代<sup>[46]</sup>。以天文学为例，在大型巡天时代到来之际，收集到的天体信息的数量、质量和丰富度达到了前所未有的高度，天文学的研究也越来越离不开大数据集的统计分析，即数据挖掘和知识发现<sup>[47]</sup>。针对我国农田究竟是丢碳还是固碳这一争论，“中国土壤数据库”分别为“全球农田土壤固碳潜力研究”“草地生态系统固碳速率和潜力模拟与区域集成”“草地生态系统固碳现状、速率、潜力与机制”等课题提供本底土壤数据，经过碳采样分析和土壤数据库历史数据的比对分析，终于清楚了我国区域土壤的固碳、弃碳程度<sup>[48]</sup>。

(5) 服务社会民生。让数据在碰撞中聚变、充分释放大数据价值是中国科学院数据云的应用目标，中国科学院数据云面向社会需求不断加强产业化创新服务，提升拓展技术优势，涌现出基于大数据的尝试与探索。中国科学院动物研究所联合微生物研究所、遗传与发育研究所、上海生命科学研究院等机构完成的“基于作物-病虫害信息识别的农业安全重大技术”，系统解析了作物-病虫-微生物之间生物信息流机制，攻克了小麦白粉病、培育出高抗黄萎病棉花品系，成功控制了农业重大病虫害<sup>[49]</sup>。中国科学院自动化研究所整合现有的百余套语料库形成了语言资源数据库，建立了数据支撑服务平台并积极开展与企业合作，将语料库应用到企业的创新技术、新产品研发

中,基于“语音合成语料库”等数据资源研发的语音合成技术,已与三星和联想分别合作,应用在其多款手机中<sup>[50]</sup>。

### 3.3 科学数据开放共享中的障碍分析

科学数据共享一直被探讨、分析和推广,但科学数据共享的实践和发展仍存在诸多障碍。从目前的诸多研究和实践效果来看,这些障碍主要来自以下几个方面<sup>[51-53]</sup>:①技术问题:针对自然学科领域尤其是天文学、高能物理、生物医药等数据密集型领域,如何实现超高数量数据的实时保存和处理、关联数据集的瞬间发现与过滤,数据的自动化流转与加工等都是应该思考的问题。②费用问题:数据生产、管理、共享过程中的时间花费、人力资源花费以及资金的投入由谁承担、承担比例如何分配等问题都需要在规划时有比较充足的预算,明确各阶段的费用承担者。③法律问题:即数据共享的发布和再利用等过程中涉及的法律问题,原始数据作者对数据拥有多少数据知识产权、原始作者对数据的责任承担程度、侵权行为发生时的合理解释以及通过何种有效的法律手段防止数据再利用可能带来的负面影响,都是数据共享需要解决的法律问题。④隐私问题:心理学、统计学、医学、生物学等学科在调查研究中所涉及用户的家庭信息、健康信息、收入情况、社会关系等隐私信息,重大科研项目可能涉及国家机密信息,这些信息该不该共享、如何共享以及如何平衡完全开放共享与隐私、机密保护之间的关系值得考虑。⑤伦理问题:数据发布时的伪造、阉割问题,数据引用时的错用、误用和错误诠释问题以及对数据的盗用、篡改等问题会给数据使用者和数据原始生产者带来消极影响和危害,加强科学诚信体系建设、科研道德建设任重而道远。⑥激励问题:科研成果的出版是对研究者劳动付出的回报和名誉的保证,而科学数据的共享要思考建立何种机制来评价科研工作者的工作成效,采取何种方式来保证对作者的回报以及激发他们共享科学数据的积极性。

### 3.4 科学数据开放共享关键技术

针对科学数据的特点及共享需求,可以将涉及的关键技术归纳为数据关联融合、数据实时分析、数据长期保存、数据安全共享等<sup>[54]</sup>。

#### 3.4.1 数据关联融合

数据融合是指聚合数据、信息和知识片段之间的多维度、多粒度关联关系,以实现更多层面的知识交互<sup>[55]</sup>。科学数据融合与数据库领域的数据集成以及人工智能和认知科学中的知识融合有所区别,它不仅需要运用动态方式将离散的数据转化为统一的知识资源,而且需要挖掘隐含的知识关联,进而实现知识的深层次理解。例如,经过简单的数据融合后,我们仅能将碎片化信息集中形成了表层知识,但为了更好地探索各数据之间复杂的逻辑关系,还需要将隐性知识显性化,将表层知识上升到普遍机理。具体而言:就是要根据数据分布规律归纳结构规则,抽象出数据之间的关联模式来表示知识并挖掘知识之间多元关系和隐含语义关系,然后通过关系推演技术将显性知识隐性化,最后通过可视化技术呈现数据关系。



### 3.4.2 数据实时分析

科学数据量正以 TB 级甚至 PB 级的速度增长, 因此对科学数据的分析也需要从批量处理向实时分析转变。以卫星遥感数据为例, 其具有异构性、多尺度、动态性、海量化等特点, 高效率的遥感参量产品生产是未来大规模遥感数据服务的核心<sup>[56]</sup>, 只有对数据经过加工处理后, 才能得到更有研究价值的产品。因此, 需要设计可快速入库的缓存机制以提高数据存储能力, 以及分布式多级缓存机制和可拓展消息队列以实现数据的快速存储和传输。为满足高速数据采集下的实时分析需求, 一般采用针对批量外存数据的大规模并行处理技术和数据流查询处理技术, 可设计同步批处理和流式处理适配器, 通过统一的查询接口实现全量数据查询。此外, 实时返回查询结果日益成为用户考虑的因素之一, 这就需要科学数据系统能够及时不断地提供查询反馈, 以使用户快速优化后续查询结果。

### 3.4.3 数据长期保存

随着科学数据总量的迅速增长和数据复杂性的不断增加, 科学数据的存储问题越发棘手, 所以长期保存海量数据并提供高效的实时处理成为当务之急。随着云服务在大数据管理和分析方面的重要性不断提升, 云服务的多样性也在逐步增加, 可借助云存储的海量存储、灵活扩展、协同共享、成本低廉等优势将计算资源和数据资源整合到云端<sup>[57]</sup>。在数据存储中, 在线云存储系统可以将数据进行规范化备份处理, 所有的应用资源都通过管理终端提供服务, 可以有效提升数据的安全性、敏捷性及服务效率; 在文件管理中, 分布式云存储技术可以实现大规模资源的并行存储与处理, 云端及授权用户可以互相链接, 进而让用户可以拥有云存储能力; 在灾难恢复方面, 云存储可以有效地进行数据远端备份, 避免不可抗因素或人为失误带来的数据破坏, 也可以对损失的数据进行恢复<sup>[58]</sup>。

### 3.4.4 数据安全共享

科学数据共享牵扯到众多相关利益者, 要实现海量数据在各相关方之间快速、安全、高效地运转较为困难。区块链是伴随数字加密货币而逐渐兴起的一种新的基础架构和分布式计算范式, 具有去中心化、时序数据、集体维护、可编程、安全可信等特点, 特别适合构建可编程的宏观系统<sup>[59]</sup>。以医疗领域为例, 由于医疗数据在校验、保存和同步方面比较困难, 患者、医生及研究人员在访问和共享医疗数据时遇到权限审查和数据校验等限制, 整个响应过程存在响应缓慢、数据可篡改、数据传输不安全等问题。借助区块链的分布式决策模式, 可有效去除中间机构, 对交易数据进行自动化处理、传输和存储, 大幅提升数据共享效率<sup>[60]</sup>。此外, 区块链使用的加密算法和共识机制, 可防止共享中的抵赖、篡改和欺诈行为。集快速高效和安全可靠于一身, 区块链已经成为一种新的数据共享模式<sup>[61]</sup>。

## 4 总结与展望

随着科学数据数量的快速增长, 在世界范围内, 多个领域开始关注科学数据并将其

作为开放共享对象,成立了相应的科学数据部门并实施了相关项目,形成了多种科学数据共享模式。我国也日益重视科学数据管理与共享工作,以中国科学院数据云为代表的科学数据共享实践在支撑国家重大科技创新、促进国际合作共享、推动生态文明建设、驱动科学前沿发现、参与社会事物治理等方面成效显著,取得了一批令人瞩目的成就。但由于技术、费用、法律、激励机制等障碍,我们与国外发达国家的科学数据共享实践相比还存在不少差距,主要表现在以下方面<sup>[62]</sup>:

(1) 缺乏规范化的科学数据资源建设和积累。美国、英国、澳大利亚等国家由公共财政产生的科学数据都通过统一渠道进行汇交,通过提供长期存储和数据分析挖掘分析能力实现科学数据的长期积累。相比较而言,我国的科学数据资源分布不均,应用领域分布着大量数据,而基础与前沿领域数据量较少;数据管理分散,科技部、教育部、卫生部、中国科学院等部门机构都对数据实施管理,但没有形成统一的专门管理机构;数据流失严重,大量的科学数据散落在课题组或科学家手中,项目完成后数据也随之被丢弃。

(2) 需要出台科学数据管理政策。美国最先将“完全与开放”的科学数据共享政策作为基本国策并多次修订《信息自由法》来构建国家信息公开和数据资源共享制度框架;英国、加拿大、澳大利亚也制定了《信息准入法》并形成了自上而下的政策制度体系。我国虽然在《“十三五”纲要》《“十三五”国家科技创新规划》《“十三五”国家信息化规划》等文件中都提出了加强科学数据共享的相关内容,但仍然缺少对科学数据管理和共享的宏观层面的政策法规,在部门和单位层面仍然存在科学数据管理失策问题。

(3) 科学数据管理水平有待提高。中国科学院计算机网络信息中心曾经对我国科研人员采集、使用和处置科学数据的经历和体会进行了一次大规模的问卷调查,超过六成的受访者表示所在的科研团队/课题组一般将生产和收集的数据存放在科研人员的个人电脑上,将近三成的受访者表示所在的科研团队/课题组一般将生产和收集的数据保存在实验室的数据存储库或数据库中。这表明超过九成左右的研究者所在的科研团队/课题组并没有对生产和收集的科学数据进行归档或没有较理想的数据归档长期解决方案。

(4) 科学数据中心建设薄弱。科学数据中心是开展科学数据管理和共享的专业化机构,美国、英国、澳大利亚等国家已经建立了数据保存中心、数据档案中心、国家数据服务中心等国家级科学数据中心。尽管我国也组织建设了国家科技基础条件平台并开放了多个科学数据中心,但各数据中心在建设规模、人员配置、管理水平、运营能力等方面参差不齐,鲜有在国际上具有巨大影响力的科学数据中心。此外,多数数据中心尚未形成多层次的人才梯度制度,缺乏高水平的数据科学家,年龄断层、学历断层现象突出。

针对我国科学数据共享工作的现状及特点,借鉴国外在科学数据共享方面的实践经验,提出完善我国科学数据资源开放共享等相关建议<sup>[63]</sup>:

(1) 加强科学数据管理与共享政策体系建设。科学数据共享是一项综合性的系统工程,必须有国家相关政策的指导与调控,完善的法规体系是引导、推动科学数据共享工作的最直接途径。在国家层面,制定针对性法律法规规范科学数据管理与共享,完善与科学数据管理相关的规章制度,发挥国家层面的机构推动作用;在行业部门层面,根据具体科学领域特点,推动行业部门建立科学数据共享规章制度,行业协会加强对科学数



据的管理与共享的引导,消灭行业数据资源信息孤岛。

(2) 建设国家科学数据共享中心。确立科学数据管理与共享的战略地位<sup>[64]</sup>,突出数据需求导向,国家层面制定和完善科学数据相关的战略规划,围绕国家重大战略需要、重大科研项目与服务和支持和各类重大科技创新活动,统筹建设一批具有国际水平的国家级科学数据共享中心。以这些科学数据中心为基础,完善相应的科学数据管理和共享服务机制,培养一批专业化的科学数据管理与服务人才参与观测数据、特色数据、重大战略关键数据等的积累、管理和共享,最终形成国家科学数据服务保障体系。

(3) 加大科学数据增值利用力度。科学数据管理与共享不仅要服务于科学研究,还应该对社会经济发展、企业创新、人才培养服务。政府部门应主动将掌握的大量科学数据开放共享,开放可供数据二次开发利用的标准应用程序接口。推行有利于数据共享、再利用和互操作的数据标准,使科学团体、科研机构、数据中心等公共部门产生的科学数据能够顺利实现共享。国家投资产生的国土、气象、地理、卫生、交通等领域的数据应坚持公益原则,大力发展增值利用服务;盈利机构或个人投资的科学数据,可以实行商业化运行,探索有偿服务,培育相关科学数据产品市场和产业。

(4) 培养科学数据相关管理人才。作为基础性、公益性、长期性的科学数据管理与共享工程,需要专业技术人才队伍建设与维护。图书情报、计算机科学相关专业是与数据、信息联系最为紧密的学科领域,可以在这些专业的研究方向和课程设置中逐步增加科学数据管理相关内容,在一些核心课程中增加科学数据相关章节或知识点。此外,在科学数据管理服务支撑单位(如图书馆、信息中心等)对馆员、服务人员开展网络交流、进修、论坛会议、管理实践等科学数据管理培训,增加他们的服务能力。

科学数据开放共享是一个长期的系统化过程,在共享前需要准确回答什么数据应该被共享、被谁共享、和谁共享、在什么条件下共享、为什么共享以及要做什么努力等问题<sup>[65]</sup>,共享时要聚力多方资源协同操作,共享后要加强服务效益监管,唯有如此才能真正发挥科学数据共享的作用。相信随着人们对共享重要性认识的不断加深、各国在政策管理机制上的不断完善以及共享技术的不断升级,科学数据开放共享一定能为科技创新发展提供更加强有力的支撑。

## 参 考 文 献

- [1] 孙九林,黄鼎成,李晓波.我国科技数据管理和共享服务的新进展[J].世界科技研究与发展,2002(5):15-19.
- [2] 张红.我国科技资源共享的现状及其分析[J].科技与法律,2007(2):18-24.
- [3] Borgman C L.大数据、小数据、无数据:网络世界的学术[M].孟小峰,张玮,赵尔平,译.北京:机械工业出版社,2017.
- [4] 黄鼎成.科学数据共享的理论基础与共享机制[J].中国基础科学,2003(2):24-29.
- [5] Christine L.Borgman.The Conundrum of Sharing Research Data[J].Journal of the American Society for Information Science and Technology,2012,63(6):1059-1078.
- [6] Wilkinson M D,Dumontier M,Aalbersberg I J J et al.The FAIR Guiding Principles for scientific data management and stewardship[J].Scientific Data,2016(3):1-9.

- [7] Force11.The FAIR Data Principles[EB/OL].[2017-11-11].<https://www.force11.org/group/fairgroup/fairprinciples>.
- [8] Mons B,Neylon C,Welterop C,et al.Cloudy,increasingly FAIR:revisiting the FAIR Data guiding principles for the European Open Science Cloud[J].Information Services & Use,2017(37):49-56.
- [9] 陈光.大科学装置的经济与社会影响[J].自然辩证法研究,2014(4):118-122.
- [10] 吴军.可用于大科学装置的数据采集和信号处理系统的研究[D].合肥:中国科学技术大学,2016.
- [11] 国家生态系统观测研究网络.国家生态系统观测研究网络建设时期的主要工作任务[EB/OL].[2017-11-11].[http://www.cern.org/menuList.action?article\\_class\\_id=2&flag=2](http://www.cern.org/menuList.action?article_class_id=2&flag=2).
- [12] 程耀东,陈刚.科研大数据平台关键技术与实践[J].工程研究-跨学科视野中的工程,2014(3):266-274.
- [13] 朱琳,聂华,崔海媛,等.北京大学开放研究数据平台建设:探索与实践[J].图书情报工作,2016(4):44-51.
- [14] 黄永文.基于数据库联邦方式的多数据源集成检索系统[J].现代图书情报技术,2005(11):57-60.
- [15] 国家科技基础条件平台.国家地球系统科学数据共享服务平台[EB/OL].[2017-10-19].<http://www.geodata.cn/aboutus.html>.
- [16] 邓英,饶莉,李桂东.科学数据出版——我国科技期刊出版之内容创新[J].编辑之友,2017(4):39-43.
- [17] 张小强,李欣.数据出版理论与实践关键问题[J].中国科技期刊研究,2015(8):813-821.
- [18] 张丽丽.科学数据共享治理:模式选择与情景分析[J].中国图书馆学报,2017(2):54-65.
- [19] 张丽丽,黎建辉.科研数据的开放:进展、模式与新探索[J].大数据,2016(6):25-33.
- [20] 邱春艳,黄如花.近3年国际科学数据共享领域新进展[J].图书情报工作,2016(3):6-14.
- [21] Scientific data: open access to research results will boost Europe's innovation capacity[EB/OL].[2017-10-19].[http://europa.eu/rapid/press-release\\_IP-12-790\\_en.htm](http://europa.eu/rapid/press-release_IP-12-790_en.htm).
- [22] Open Access Guidelines for researchers funded by the ER[EB/OL].[2017-10-21].[http://erc.europa.eu/sites/default/files/document/file/open\\_access\\_policy\\_researchers\\_funded\\_ERC.pdf](http://erc.europa.eu/sites/default/files/document/file/open_access_policy_researchers_funded_ERC.pdf).
- [23] 一线图情.美国大学与研究图书馆协会公布了“2013年高校图书馆趋势和统计情况”[EB/OL].[2017-11-11].<http://sx.chinalibs.net/Zhaiyao.aspx?id=372752>.
- [24] 台湾国际咨询整合联合协.2014地平线报告:图书馆篇[EB/OL].[2017-11-11].[http://blog.sina.com.cn/s/blog\\_eb9fbb0e0102v4xy.html](http://blog.sina.com.cn/s/blog_eb9fbb0e0102v4xy.html).
- [25] Hess L,Baine K,Kirk N,et al.Scientific data:how do you manage it without losing it?[J].Journal of Avian Medicine and Surgery,2017,31(1):70-74.
- [26] Federer L M,Lu Y L,Joubert D J,et al.Biomedical data sharing and reuse:attitudes and practices of clinical and scientific research staff[J].PLoS One,2015,10(6):1-17.
- [27] Scherz P.The legal suppression of scientific data and the christian virtue of parrhesia[J].Journal of the Society of Christian Ethics,2015,35(2):175-192.
- [28] Takeuchi S,Sugiura K,Akahoshi Y,et al.Spatio-temporal pseudo relevance feedback for scientific data retrieval[J].IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering,2017,12(1):124-131.
- [29] 完颜邓邓,高峰.英美澳科学数据存储与共享平台建设现状调查及启示[J].图书馆建设,

- 2016(3):29-34.
- [30] 司莉,邢文明.国外科学数据管理与共享政策调查及对我国的启示[J].情报资料工作,2013(1):61-66.
- [31] 张静蓓,吕俊生,田野.国外数据共享行为影响因素研究综述[J].图书情报工作,2014,58(4):136-142.
- [32] 陈欣,叶风云,汪传雷.基于扎根理论的社会科学数据共享驱动因素研究[J].情报理论与实践,2016,39(12):91-98.
- [33] 庄倩,常颖聪,何琳.基于关联数据的科学数据组织研究[J].情报理论与实践,2016,39(5):22-26.
- [34] 邓仲华,黄雅婷.“互联网+”环境下我国科学数据共享平台发展研究[J].情报理论与实践,2017,40(2):128-132.
- [35] 光明网.中国科学院科学数据云成就与展望[EB/OL].[2017-11-11].[http://tech.gmw.cn/2017-02/20/content\\_23770047.htm](http://tech.gmw.cn/2017-02/20/content_23770047.htm).
- [36] 黎建辉,周园春,胡良霖,等.中国科学院科学数据云建设与服务[J].大数据,2016(6):3-13.
- [37] 李建荣,张扬.开放科学数据,助推科技创新——中国科学院建成开放服务的科学数据云[N].科技日报,2016-04-12(7).
- [38] 中国科学院文献情报中心.《“一带一路”沿线国家生物技术发展报告》在津发布[EB/OL].[2017-11-13].[http://www.clas.ac.cn/xwzx/2016/kyhd/201711/t20171113\\_4890756.html](http://www.clas.ac.cn/xwzx/2016/kyhd/201711/t20171113_4890756.html).
- [39] 王卷乐,孙九林,诸云强,等.关于制定“‘丝绸之路经济带’国际智库网络与协同平台科技支撑计划”的思考[J].中国科学院院刊,2015(1):46-52.
- [40] 中国生态系统评估与生态安全数据库.服务案例[EB/OL].[2017-11-13].<http://www.ecosystem.csdb.cn/listfckpager.jsp?fcid=3>.
- [41] 中国科学院南海海洋研究所.南海海洋科学数据库获中国科学院信息化研究论文和平台应用奖[EB/OL].[2017-11-13].[http://www.scsio.cas.cn/xwzx/kydt/201010/t20101008\\_2979150.html](http://www.scsio.cas.cn/xwzx/kydt/201010/t20101008_2979150.html).
- [42] 中国湖泊科学数据库.服务案例[EB/OL].[2017-11-13].<http://www.lakesci.csdb.cn/extend/jsp/fwal>.
- [43] 南海网.大亚湾中微子实验入选《科学》年度10大科学突破[EB/OL].[2017-11-13].<http://www.hinews.cn/news/system/2012/12/23/015274039.shtml>.
- [44] 中国核电网.诺奖级别实验发布世界最高精度中微子测量结果![EB/OL].[2017-11-13].<http://np.chinapower.com.cn/201509/18/0047569.html>.
- [45] 王亚楠,庄会富,王雨华.支持植物学大数据整合与公众服务的iFlora云平台建设[J].大数据,2016(6):34-42.
- [46] 郭华东.大数据大科学大发现——大数据与科学发现国际研讨会综述[J].中国科学院院刊,2014,29(4):500-506.
- [47] 张彦霞,崔辰州,赵永恒.21世纪天文学面临的大数据和研究范式转型[J].大数据,2016(6):65-74.
- [48] 中国土壤数据库.中国土壤数据库服务案例[EB/OL].[2017-11-13].[http://vdb3.soil.csdb.cn/extend/jsp/index\\_service](http://vdb3.soil.csdb.cn/extend/jsp/index_service).
- [49] 中国科学院.“十八大”以来中国科学院创新成果展[EB/OL].[2017-11-13].[http://cxcj.cas.cn/ccg/mxgmjjzcc/fwnyfszsb/201705/t20170510\\_4528098.html](http://cxcj.cas.cn/ccg/mxgmjjzcc/fwnyfszsb/201705/t20170510_4528098.html).
- [50] 中文语言资源联盟.资源列表[EB/OL].[2017-11-13].[http://www.chineseldc.org/resource\\_list](http://www.chineseldc.org/resource_list).

- php?begin=0&count=20.
- [51] 赵阳,文庭孝.大数据共享及其障碍分析[J].高校图书馆工作,2017(4):44-48.
- [52] 黄如花,邱春艳.国外科学数据共享研究综述[J].情报资料工作,2013(4):24-30.
- [53] 殷沈琴,张计龙.研究数据的共享:历程、障碍、课程培训[J].上海高校图书情报工作研究,2015(1):6-8.
- [54] 黎建辉,沈志宏,孟小峰.科学大数据管理:概念、技术与系统[J].计算机研究与发展,2017(2):235-247.
- [55] 孟小峰,杜治娟.大数据融合研究:问题与挑战[J].计算机研究与发展,2016,53(2):231-246.
- [56] 修佳鹏.海量卫星遥感数据参量产品自动化生产系统中关键问题的研究[D].北京:北京邮电大学,2014.
- [57] 胡昌平,王丽丽.国外面向数字学术资源的云存储服务安全研究[J/OL].情报理论与实践:1-11[2017-12-23].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1762.G3.20171123.1119.012.html>.
- [58] 吴宇,彭霖.云存储技术在研究所信息化建设中的运用[J/OL].电子技术与软件工程,2017(15):192[2017-12-23].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/10.1108.TP.20170803.1503.306.html>.
- [59] 袁勇,王飞跃.区块链技术发展现状与展望[J].自动化学报,2016,42(4):481-494.
- [60] 丁伟,王国成,许爱东,等.能源区块链的关键技术及信息安全问题研究[J/OL].中国电机工程学报:1-9[2017-12-22].<https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.170353>.
- [61] 薛腾飞,傅群超,王枫,等.基于区块链的医疗数据共享模型研究[J].自动化学报,2017,43(9):1555-1562.
- [62] 国家科技基础条件平台中心.国家科学数据资源发展报告(2016)[M].北京:科学技术文献出版社,2016.
- [63] 黄如花,王斌,周志峰.促进我国科学数据共享的对策[J].图书馆,2014(3):7-13.
- [64] 中国日报.中国科学院院长白春礼呼吁制定国家大数据战略[EB/OL].[2017-11-13].[http://www.chinadaily.com.cn/hqgj/jryw/2012-12-30/content\\_7902453.html](http://www.chinadaily.com.cn/hqgj/jryw/2012-12-30/content_7902453.html).
- [65] Borgman Christine L.(著),青秀玲(译).科研数据共享的挑战[J].现代图书情报技术,2013(5):1-20.

## 作者简介



黎建辉,中国科学院计算机网络信息中心研究员,大数据分析 with 计算技术国家地方联合工程实验室常务副主任,国际科技数据委员会(CODATA)执委,CODATA 中国委员会秘书长,《中国科学数据》常务副主编。长期从事数据开放政策与实践、超大规模分布式数据管理技术与系统、数据云服务技术、大数据管理技术、大数据计算与分析技术等方面的研究工作。

# 地理信息大数据的高效获取——国产三线阵立体航摄系统

郑丽娜 远国勤 匡海鹏

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所)

## 摘要

航空遥感作为地理数据获取的主要途径之一,对于大数据时代的地理信息产业发展意义重大。本文以国产三线阵立体航摄系统为主要研究对象,分析了地理信息大数据获取对航摄系统研制的信息化应用需求,介绍了航空遥感设备的研制现状,描述了三线阵立体航摄系统的工作原理及技术指标,探讨了航摄系统在数字城市建设、抗震救灾、资源航遥、环境保护、国土安全等方面的信息化应用前景。

## 关键词

三线阵立体航摄系统;地理信息大数据;信息化应用;自主知识产权

## Abstract

As one of the main approaches to acquire geographic data, aerial remote sensing is of great significance to the development of geographic information industry in the era of big data. By taking the domestic three-line array stereo aerial photography system as the main research object, this paper analyzes the information application demands for the development of aerial photography system by geographic information big data acquisition, introduces the development status of aerial remote sensing equipment, describes the working principles and technical indexes of three-line array stereo aerial photography system, and discusses the information application prospect of the aerial photography system in aspects such as digital urban construction, earthquake relief works, resource aerial remote control, environmental protection and homeland security.

## Keywords

Three-Line Array Stereo Aerial Photography System; Geographic Data; Information Application Prospect; Independent Intellectual Property Rights

## 1 引言

2011年至2014年,大数据新兴技术从萌芽期发展到过热期和低谷期,世界各国都十分重视大数据发展,2015年8月,我国印发了《促进大数据发展行动纲要》(以下简称《纲要》),正式实施大数据发展战略。《纲要》明确了未来5至10年我国大数据发展和应用要实现的目标和主要任务,并提出了大数据领域建设的十大工程。《纲要》的印发,标志着我国地理信息产业发展的大数据时代已经来临。

地理信息大数据中,数据获取居于核心地位<sup>[1]</sup>,而地理数据获取的主要途径之一就是航空航天对地观测。地理信息大数据的获取,离不开对地观测设备的支持。对地观测



设备可分为航天相机、航空相机及超低空无人飞行器等。星载的航天相机可在轨获取全球的地面图像,但由于尺寸、体积、焦距、重量和轨道高度的限制,地面分辨率相对较低,重访时间较长,实时性及机动性受到限制,无法满足紧急对热点区域进行观测的需要;超低空无人机测绘具有成本低、机动灵活等优点,在小区域及飞行困难地区具有一定的优势,但其单位时间内测量的区域范围有限,测绘效率不高,只能作为高效摄影测量技术的补充手段;而机载航空相机可以装载在运-5、运-12等通用的航空平台上,飞行高度500~5000m,可快速、机动地获取地面的高分辨率影像数据,具有高效率、机动灵活、高精度等特点,应用范围广,更适合大数据时代地理信息的获取。开展机载航空测绘相机的研究及应用,对于地理信息大数据的高效获取具有重要意义。

2000年以来,国际上陆续出现了不同类型的航空测绘相机并开始在国内外的测绘行业中应用,开启了数字测绘相机替代胶片航摄相机的新时代。国外航摄相机有代表性的主要有DMC、Ultracam、ADS40/80等<sup>[2]</sup>,国内航空测绘相机研制起步较晚,主要技术指标与国外先进水平的航摄相机还存在较大差距,高精度数字航摄相机主要依靠进口。为此,国家高分专项(民用部分)根据我国民用航空摄影现状,发布指南提出研制大视场三线阵立体航摄相机,该相机以民用航空飞机为作业平台,是一种能够同时获取全色立体影像和彩色多光谱影像的多功能、数字化的航空遥感器,具有高精度、高分辨率及宽覆盖的特点,飞行高度2000米支持1:1000成图比例尺,具备执行航空应急对地观测任务的能力,并可满足自然灾害监测、城市精细化管理、资源调查、地理测绘对高分辨率三维影像数据的应用需求。

## 2 航空遥感设备的研制现状

按照成像方式,数字航空测绘相机可分为框幅式和推扫式两大类。框幅式相机数据处理流程简洁,能够提供较多的冗余观测值用于解算,但其基高比较小,高程精度不高,且作业时要求较高的重叠率,导致图像文件数据量大,处理时间较长;推扫式相机能够保证严格的中心投影<sup>[3]</sup>,像素显示连续,无须进行图像拼接,不需要快门机构,相机可靠性高,基高比较大,具有更高的高程精度。

航空框幅式测绘相机的代表性产品有DMC和UltraCam系列相机,DMC相机外形如图1所示,主要技术指标如表1所示;Ultracam相机外形如图2所示,主要技术指标如表2所示。



图1 DMC相机外形

表 1 DMC 相机主要技术指标

相机	DMC-II 140	DMC-II 230	DMC-II 250
像元数	12 096×11 200	15 552×14 144	16 768×14 016
像元尺寸 (μm)	7.2	5.6	5.6
焦距 (mm)	90	92	112
视场角	50.7° ×43.3°	50.7° ×46.6°	45.5° ×38.6°
GSD@500m	3.9cm	3.0cm	2.5cm
成像通道	全色、RGB、近红外	全色、RGB、近红外	全色、RGB、近红外



图 2 UltraCam 相机外形

表 2 UltraCam 相机主要技术指标

相机	UltraCam-XP	UltraCam-Xp WA	UltraCam-Eagle
像元数	17 310×11 310 (全色通道) 5 770×3 770 (多光谱)	17 310×11 310 (全色通道) 5 770×3 770 (多光谱)	20 010×13 080 (全色通道) 6 670×4 360 (多光谱)
像元尺寸 (μm)	6	6	5.2
焦距 (mm)	100 (全色通道) 33 (多光谱)	70 (全色通道) 23 (多光谱)	80 (全色通道), 210 (第二组全色镜头) 27 (多光谱), 70 (第二组多光谱镜头)
视场角	55° ×37°	73° ×52°	66° ×46° (第二组 : 28° ×20° )
颜色通道	全色、RGB、近红外	全色、RGB、近红外	全色、RGB、近红外

航空推扫式测绘相机国外最先进的是 ADS40/80 相机, 相机外形如图 3 所示, 而国内新研制了大视场三线阵立体航摄相机, 其外形如图 4 所示, 作为国产新一代航空推扫测绘相机, 其主要技术指标与 ADS40/80 对比如表 3 所示。

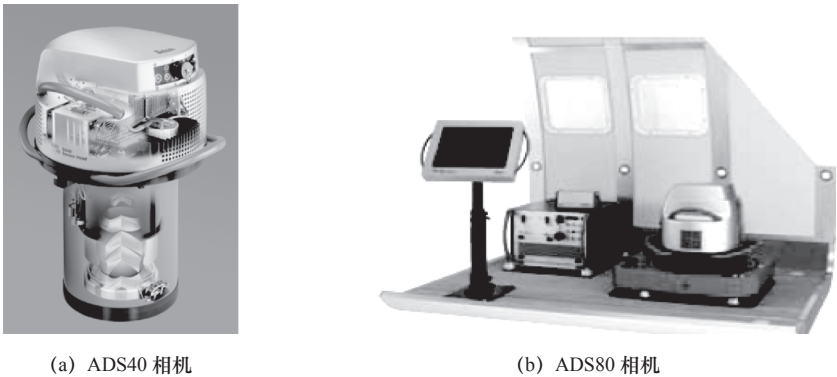


图 3 ADS40/80 相机外形



图 4 国产三线阵立体航摄相机外形

表 3 三线阵立体航摄相机与 ADS40/80 主要技术指标对比

参数	ADS40/80	大视场三线阵相机
焦距（mm）	62.77	130
像元数	12 000	32 768
像元尺寸（ $\mu\text{m}$ ）	6.5 $\times$ 6.5	5 $\times$ 5
2 000m 距离像元分辨率（m）	0.207	0.077
相同分辨率（0.1m）时覆盖宽度	1 206.9	3 249.3

由表 3 主要技术指标对比可以看出，大视场三线阵立体航摄相机不仅填补了国内空白，其主要技术指标是国外先进推扫航摄相机的数倍，代表了我国航空推扫相机的研制水平已跻身世界前列，对于地理信息大数据时代数据高效获取有着重要的意义。

### 3 国产三线阵立体航摄系统组成及工作原理

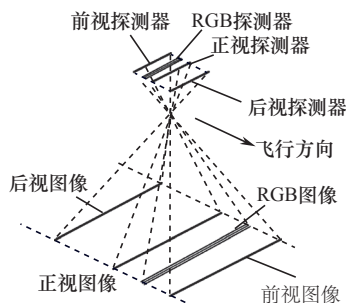
大视场三线阵立体航摄系统主要由相机本体、稳定平台、控制柜、图像数据处理软件组成,为了实现相机轻量化及满足装机空间,相机采用了长焦距、大视场单镜头透射式光学系统,通过在相机焦面中布置多条不同角度的探测器技术实现立体测绘。

相机本体包括光学镜头、焦平面组件、IMU、温控组件、电源、光电转换单元等,相机光学镜头采用了像方远心的光学系统,使得所有方向的入射光线都近似垂直焦平面,最大限度地减少影像变形和光谱失真;在镜头焦面上集成了3条全色及1条RGB探测器,这4条探测器相互平行排列并与飞行方向垂直,其中3条全色探测器的成像角度不同,垂直对地成像的为下视探测器,向前倾斜成像的为前视探测器,而向后倾斜成像的为后视探测器。相机配备了与光轴重合的高精度IMU记录拍照时每行图像的外方位元素;温控组件能够有效补偿温度、压力等环境变化对相机性能的影响,保证相机宽环境适应能力;本控电源将飞机电源滤波并转换后提供给相机本体;主控单元控制相机按照本控单元的指令进行拍照;光电转换单元将图像数据进行转换后输出给存储单元。

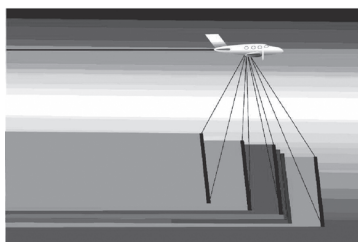
控制柜包括控制柜电源、本控计算机、POSPCS及图像存储单元等。控制柜电源将飞机电源滤波后提供给控制柜各组件;本控计算机上安装有人机交互的控制软件,操作人员可输入工作指令及工作参数,同时实时显示相机的工作状态;POSPCS为POS系统自带的控制系统,用于对IMU及GPS输出数据进行管理并记录相机曝光时刻的外方位元素数据;图像存储单元将相机输出的影像数据进行存储,用于后期数据处理软件的处理。

为了减少载机飞行姿态变化对成像质量的影响,相机采用三轴稳定平台补偿飞行姿态的影响。

相机工作原理如图5所示,相机成像时,焦面上各线阵探测器对地面连续采样,同



(a) 三线阵相机探测器布置示意图



(b) 相机成像示意图

图5 相机工作原理

时获取完全重叠的前视全色 PAN 波段、下视全色 PAN 波段、后视全色 PAN 波段，以及 R、G、B 单波段图像，能直接生成多个立体像对及进行彩色影像的合成。相机集成的高精度 GPS 和 IMU，可以为每条扫描线提供外方位元素的观测值，降低了对外业控制点的依赖，相机可在无地面控制点的情况下完成对地面目标的大比例尺测绘。

4 地理信息大数据的高效获取技术及实现过程

大视场三线阵立体航摄系统获取地理信息的过程如图 6 所示，系统通过飞行规划、空中摄影、数据存储下载、空三测量、影像纠正、编辑成图等处理，可生成 3D 的数字表面模型（DSM）、正射影像等图像产品。

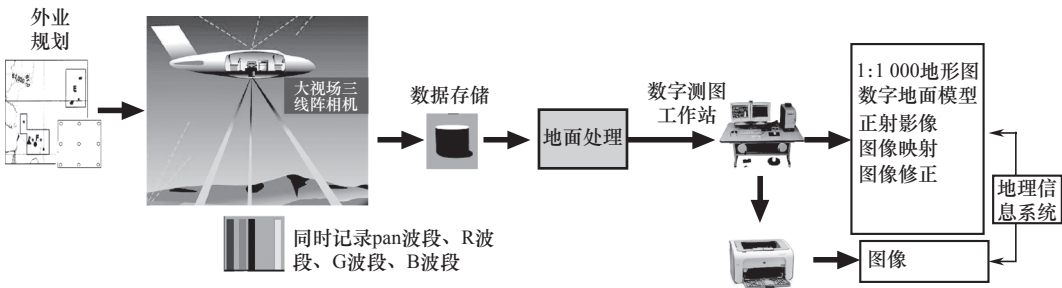


图 6 大视场三线阵立体航摄系统获取地理信息的过程

地理信息数据的获取过程可分为三个阶段：第一，载机起飞前的地面准备工作，包括测区航带的设计、相机参数的设置、飞行模式的设定等；第二，起飞及驶入航带进行航摄，同时进行数据记录和存储等；第三，完成航摄任务并对获取的影像进行信息化处理。

影像的信息化处理是地理数据获取的核心，主要处理流程包括图像预处理、空中三角测量、DSM 计算，真正射影像制作等。

图像预处理主要是对影像进行辐射纠正、大气校正、辐射增强等，保证同名影像点之间色调的一致性。

空中三角测量是影像处理的关键步骤，目的是根据少量的野外控制点求得影像的外方位元素和加密点的坐标与高程。空中三角测量根据影像的 POS 数据生成航带，建立影像间的拓扑关系，在影像重叠范围自动提取相片的同名连接点，通过迭代法对大量的连接点进行运算，剔除粗差点。利用外业测量的像控点数据作为起算数据，通过光束法区域网平差方法，最终获得加密点三维坐标和每张影像的精确外方位元素。

DSM 计算是根据不同视角的探测器获取的图像，进行双目交汇，求出地面点的高程信息。

真正射影像图制作是根据地面点的高程信息及相机姿态数据，对垂直对地的探测器获取的图像进行几何精纠正，生产可用的地图产品。



根据上述生产过程，大视场三线阵立体航摄系统生成的信息化数据产品主要包括：

- (1) 平面测绘遥感影像产品，包括几何精纠正、正射纠正、数字正射影像图等；
- (2) 立体测绘遥感产品，包括数字表面模型、数字高程模型等；
- (3) 快速图像制作，满足应急救援，应急环境监测等用户需要；
- (4) 专题测绘产品，包括地理国情监测产品、典型地物分类产品等。

5 信息化应用现状及前景

三线阵立体航摄系统具有高分辨率、高作业效率、大基高比、高精度、自动化程度高等特点，能够满足数字城市建设、抗震救灾、资源航遥、环境保护、国土安全等数据方面的需求，具有广阔的信息化应用前景，将为地理信息市场迎来新的空间。

三线阵立体航摄系统提供的产品分类及用户如表 4 所示，可以满足不同用户的信息化要求。

表 4 三线阵立体航摄系统提供的产品分类及用户

产品等级	特点	用户单位
0 级产品	只经过成像处理，提供给本身具有辐射校正和几何校正能力的用户	主要分发给对相机成像系统进行科学研究的部门，用于对相机系统进行检测、定标等处理
1 级产品	0 级产品的基础上进行了辐射校正后的产品	主要分发给从事测绘生产、科研的单位和部门，如国家测绘局等相关部门，用于立体测图大致获取所需地理、地形要素、目标的空间位置、几何特征和相关属性数据
2A 级产品	在 1 级产品的基础上进行了几何粗校正，具有一定的精度，适用于本身无地理信息生产能力、对定位精度要求不高的用户	主要分发给从事测绘生产、林业、国土、减灾等科研单位和部门，用于立体测图精确获取所需地理、地形要素、目标的空间位置、几何特征和相关属性数据，测绘小区域大比例尺（1:2 000、1:1 000）数字地形图、数字正射影像图、数字高程模型、数字地面模型、工程图、城市图、交通图等专题测绘产品；国土、林业、减灾、地质、矿产、交通、水利等部门作相关应用
2B 级产品	在 2A 级产品的基础上进行了几何精校正和航带拼接，具有 1:1 000 的比例尺精度，对定位精度要求较高的用户	主要分发给从事测绘生产、林业、国土、减灾等科研单位和部门，用于立体测图精确获取所需地理、地形要素、目标的空间位置、几何特征和相关属性数据，测绘小区域大比例尺（1:2 000、1:1 000）数字地形图、数字正射影像图、数字高程模型、数字地面模型，以及工程图、城市图、交通图等专题测绘产品；国土、林业、减灾、地质、矿产、交通、水利等部门作相关应用

5.1 减灾

我国是世界上自然灾害最为严重的国家之一，自然灾害种类多、分布范围广、发生频率高，并呈现出并发、群发和集中爆发的特征，灾害损失持续加重<sup>[4]</sup>，严重影响了经济发展、社会进步、民生改善和国家安全。严峻的灾害形势对新时期的减灾救灾能力提

出了新的要求,必须要借助高分辨率卫星、航空遥感等高科技手段开展灾害立体监测业务,以满足国家减灾与应急处置业务工作的需要,遥感技术在我国减灾救灾领域中应用的必要性和迫切性也越来越突出。我国发射的卫星多以中低空间分辨率数据为主,无法满足各类灾情指标监测需求,特别是房屋建筑物、生命线工程等高精度识别、判读和精确评估的要求;国外的高空间分辨率遥感数据与服务价格昂贵且缺乏供给保障,同时重访时间较长,如 GeoEye 卫星重访时间为 3d,灾害发生后救灾最宝贵的初始 24h 内可能无法及时捕捉到灾区影像,应急响应能力不足。与卫星遥感相比,航空遥感平台机动灵活,应急响应能力较强,大视场三线阵立体航摄相机基高比为 0.89,地面分辨率较高,可以获取高分辨率的全色立体影像及 RGB 单波段影像,可以为灾害救助和决策提供有效的数据,满足灾害遥感监测的需要。

## 5.2 资源航遥

我国虽然地大物博、资源丰富,但就人均来讲,仍为资源短缺的国家,为此,合理利用资源,探测资源的分布、数量与质量等情况成为目前紧迫的任务<sup>[5]</sup>。利用遥感技术进行此项工作是一种行之有效的方法。虽然卫星数据分辨率不断提高,但受限于轨道高度、体积尺寸等因素,分辨率仍比较低,如美国的 TM 数据(或 ETM 数据),法国的 SPOT 数据及中巴地球资源卫星 CCD 数据等进行计算机多功能处理或融合处理,也仅能识别十米级的物体,只能满足编制 1:10 万或 1:5 万专题图的制作,同时重访时间较长,无法满足地质灾害遥感调查与监测、对重点成矿勘查区进行高分辨率观测的需要。与卫星遥感相比,航空遥感平台机动灵活,应急响应能力较强,大视场三线阵立体航摄相机具有大基高比、大视场、宽覆盖的特点,主要技术指标为国外最先进的 ADS40/80 的 2.7 倍,相机获取的高分辨率图像可为地质矿产调查,国土资源调查与评价,环境、灾害调查与评价等服务。相机可为国土资源勘探等提供快速、高效的工作模式,同时相机具有的应急工作模式可提供实时全天候的工作需求,用以紧急工作任务。

## 5.3 数字城市

数字城市是指以计算机技术、多媒体技术和大规模存储技术为基础,以宽带网络为纽带,运用 3S 技术(遥感 RS、全球定位系统 GPS、地理信息系统 GIS)、摄影测量、仿真虚拟技术等对城市进行多分辨率、多尺度、多时空和多种类的三维描述。数字城市是一个庞大的系统工程<sup>[7]</sup>,它是城市发展和社会信息化的必然趋势,也是城市发展新的经济增长点。数字制图在制图方法、制图过程、数据集成、数据存储与表达以及空间分析等诸多方面都体现出数字特征。因此,数字化区域技术在对城市规划、建设、管理与服务,环境和生态的实时监控等方面的研究都有着重要的意义。

随着“数字地球”的深入开展,信息的实时性、准确性和高效性成为数字化技术的关键,如何进行图像的实时获取与处理,以实现其实时性和自动性,是数字城市发展中面临的主要问题。大视场三线阵立体航摄相机具有高分辨率、宽覆盖的能力,作业效率高,相机获取的图像可以为数字城市建设提供空间信息。

## 5.4 环保

随着全球环境问题日益突出,环境灾害与环境事故频发,遥感技术在环境监测与管理中得到大量应用,在环境保护中发挥的作用受到国际社会的高度重视。美国、日本及欧洲的一些国家近年来都在大力发展环境遥感监测技术。当前,我国环境监测任务十分繁重,特别是对基于遥感技术的环境遥感监测有着迫切需求。遥感技术在我国环境监测管理与实际的应用范围及领域非常广,是当前环境保护管理的重要手段之一,为我国环境可持续发展发挥了重要作用<sup>[9]</sup>。

大视场三线阵立体航摄相机可以满足我国对环境监测有效遥感载荷的迫切需求,相机具有普通模式及应急模式两种工作模式,可以满足常规例行环境监测、应急环境监测两种需要,可以对环境区域进行例行遥感监测,对不同的应急事件对象,如对污染物泄漏、溢油、灾害、泥石流等进行应急观测。同时相机具有数据时效性,可根据用户需求,生产不同级别产品,可以大大提升环境污染和生态变化监测的快速响应能力,实现我国陆域水污染、大气污染和城市污染等主要环境污染问题的全天时、全天候、量化监测,满足环境保护业务化动态监测和应急响应监测的需要。

## 5.5 公安

我国高分遥感数据在公安系统的应用研究刚刚开始,应用研究成果少,应用水平较低,应用的广度和深度有待进一步扩展和深化,快速、准确地从高分辨率遥感影像中提取和挖掘公安情报信息和空间动态信息,对于提高我国公安工作的业务科技水平和应急处置能力可以起到积极的推动作用<sup>[10]</sup>。目前,我国的高分卫星无法提供实时的遥感数据,无法满足数据的实时性要求,因此进一步拓展高分遥感数据服务公安的广度和深度,具有十分重要的意义。大视场三线阵立体航摄相机具有分辨率高、机动灵活、信息精准等优点,在我国公安工作中,能够快速、有效地获取空间动态信息,可以对各种安全事故、群体性事件、恶性治安事件与案件的评估进行辅助决策支持;可以对重特大安全事件的影响范围和损失评估提供地理信息参考依据;可以为重特大交通事故点、海面紧急搜救区域的情报研判提供历史数据比对服务等。

# 6 结论

作为地理信息大数据的高效获取手段,国产大视场三线阵立体航摄相机的主要技术指标是国外最先进推扫航摄相机的数倍,代表我国航空遥感相机的研制水平已跻身世界前列,对于地理信息大数据的高效获取有着重要的意义,在减灾、资源航遥、测绘、数字城市建设等方面具有广阔的信息化应用前景。

## 参考文献

- [1] 徐枫. 大数据环境下地理信息行业发展的几点思考 [J]. 地理信息世界, 2014, 21(1):45-50.
- [2] 曾兴玉. 国外航空测绘相机的发展情况研究 [J]. 江西测绘, 2015(3):30-32.

- [3] 李海星, 惠守文, 丁亚林. 国外航空光学测绘装备发展及关键技术 [J]. 电子测量与仪器学报, 2014(5): 469-477.
- [4] 国家测绘地理信息局. 发挥测绘地理信息应急优势做好防灾减灾保障工作 [J]. 中国减灾, 2013(3):36-37.
- [5] 薛顺荣. GIS 技术在思茅—景洪地区铜多金属成矿预测中应用研究 [D]. 北京: 中国地质大学, 2001.
- [6] 张照锋, 高梅香. 测绘成果检索地理信息系统建设与应用 [J]. 测绘与空间地理信息, 2015(1):161-162.
- [7] 叶嘉安, 朱家松. 数字城市与地理信息系统 [J]. 地理信息世界, 2007(4):4-9.
- [8] 雷莹, 刘丽芬, 等. 全国第一次水利普查的基础地理信息保障服务 [J]. 地理信息世界, 2013(2):94-98.
- [9] 鞠文杰. 浅谈 GIS 技术在环境保护工作中的应用 [J]. 承德民族师专学报, 2010(2):29, 31.
- [10] 贺日兴, 孙丕龙. 公安行业警用地理信息平台建设思路及进展 [J]. 地理信息世界, 2011(6):7-11.

### 作者简介



郑丽娜, 女, 博士, 副研究员, 中国科学院大学硕士生导师。主要研究领域为航空遥感成像与测量。先后承担多项国家重大专项及型号任务, 获国防科技进步一等奖, 国家科技进步二等奖一项, 带领团队成功研制了居于国际领先地位的 AMS-3000 国产三线阵立体航测相机, 发表学术论文 20 余篇, 参与出版专著一部。

## 反应堆数值装置原型系统现状与展望

杨文<sup>1</sup> 吴明宇<sup>1</sup> 胡长军<sup>2</sup> 刘天才<sup>1</sup> 王珏<sup>3</sup> 杨宏伟<sup>1</sup> 王学松<sup>1</sup> 祁琳<sup>1</sup>

(1. 中国原子能科学研究院; 2. 北京科技大学; 3. 中国科学院计算机网络信息中心)

### 摘要

随着超级计算技术、大数据技术、高速数据传输技术的快速发展,传统工业技术面临着前所未有的战略发展机遇。高分辨率数字反应堆立足于我国快速发展的高性能计算能力,研制高置信度数字模拟软件系统并建立虚拟反应堆,为反应堆工程设计、性能优化和运行经济性、安全性和可靠性提供参考数据。其核心在于将反应堆运行工况研究从基于工程实验和仿真转变为基于科学建模和数字模拟,更真实地再现和预测反应堆运行工况,获得更丰富、更有价值的参考数据库。同时,高分辨率数字反应堆更具有普适性和实际应用价值,可用于不同类型反应堆的工程设计和运行维护,弥补工程和实验能力的不足,大幅降低反应堆研发和运维成本,显著缩短研发周期。

### 关键词

超级计算技术; 大数据技术; 数字反应堆; 虚拟反应堆

### Abstract

With the rapid development of the super computing, big data technology, high speed data transmission technology (hereinafter referred to as the three major information technology), the traditional industrial technology is facing unprecedented strategic opportunities for development. High resolution virtual reactor is the process of modeling reactor operation condition scientifically, developing the high confidence level digital simulation software system and establishing a virtual reactor, based on the rapid development of high performance computer system, in order to provide a high confidence level expert reference database of reactor design, performance optimization, operation economy, safety and reliability. The main characteristic is that it makes the realization of the simulation of reactor operation condition from the base of engineering and experiment to that of scientific verification and high degree confidence digital simulation. In this way it can reproduce and predict the reactor operation more truly and get more and more valuable expert reference database. At the same time, high resolution virtual reactor is more general and has practical value. It can be used for engineering design and operation maintenance of different types of reactors. It will make up for any deficiencies in engineering and experiment ability, reduce the reactor research and development and operational costs greatly, shorten the development cycle significantly.

### Keywords

Supercomputing Technology; Big Data Technology; Digital Reactor; Virtual Reactor



## 1 引言与数字堆定义

随着信息技术的快速发展，传统工业技术面临着前所未有的战略发展机遇。工业 4.0、中国制造 2025、互联网+等新概念日新月异，工业化和信息化深度融合已经上升为国家战略。航空、航天、汽车等工业产品技术领域已经在第一时间抓住了机遇，提出贯穿研发、设计、使用等全生命周期的虚拟样机概念，数字卫星、数字火箭、数字汽车等全数字、超现实的数字产品已经交付用户，展示了其大幅度降低成本、提高性能的巨大优势。

反应堆工程技术作为一种通过实现稳定的中子链式反应安全可靠的能量或动力传输，实现核能和平利用的复杂的工业系统工程产品，一直面临着降低成本、提高安全性和减少放射性废物的艰巨任务。高性能计算（High-Performance Computing, HPC）、高速网络传输、大数据三大信息技术的发展无疑给反应堆工程技术带来了更加有吸引力的战略性机遇。基于此，美国等个别西方国家已经走在了潮头，提出了数字反应堆（Virtual Reactor）的概念和设想，相关研究人员已经在反应堆工程技术各个专业领域进行“数字化”革命。

福岛核事故引起了人们对反应堆安全性和经济性的强烈关注。超级计算和先进建模技术的发展为人们提供了一种革新的反应堆研发理念——数字反应堆（以下简称数字堆）。数字堆一经提出即成为核工程领域的战略制高点，并很快在核能发达国家取得进展，主要如下：

美国制订并执行了 CASL 计划，侧重于现有工程设计软件的集成，并在中子学-热工水力耦合、材料计算等领域开展了深入研究，部分成果已用于其 AP1000 堆芯模拟计算。而进一步的 NEAMS 计划则在开发面向对象的多物理耦合集成模拟平台 MOOSE 基础上，正在从燃料产品线和反应堆系统级产品线开展物理-热工-结构-材料及燃料的高精细耦合模拟技术开发。

欧洲数字堆研发从反应堆安全性出发，自 2004 年起分 NURESIM、NURESP、NURNEXT 三个阶段实施。NURESIM 主要开展两相流多尺度模拟，NURESP 则基于更精细的物理模型及多尺度模拟技术，开展多物理耦合模拟程序研发，并针对二代、三代堆开展示范应用。最新的 NURNEXT 更瞄准四代堆开展软件系统优化升级，以及不确定度分析。从 NURESIM 起，反应堆材料多尺度精细模拟计算就成为欧洲数字堆研发重点之一，并在压力容器材料辐照脆化预测方面走在世界前列。

分析欧美数字堆发展策略和现状，大体上可分为三个层次：基于现有软件的集成平台；部分模块的多物理耦合建模与软件开发；物理-热工-结构-燃料及材料等紧密耦合高精细建模、软件研发及示范应用。后两个阶段则对大规模并行计算提出了强烈需求和挑战。我国紧跟国际研发热点，积极开展了数字堆研发。目前，三大核电集团（中核、广核、国电投）大体上都在积极开展基于现有软件集成的数字研发平台建设，个别点上，如基于超算的粒子输运、材料辐照脆化模拟计算等达到了国际先进水平。

“十三五”期间，中共中央办公厅、国务院办公厅印发的《国家信息化发展战略纲要》强调，要围绕“五位一体”总体布局和“四个全面”战略布局，以信息化驱动现代

化为主线，着力提高信息化应用水平。同时，中国核工业集团公司“十三五”信息化规划中，融合了信息化与核工业，提出了“数字核工业”理念，并将其列为中核集团“十三五”重点战略任务。

为积极响应国家号召，助推数字核工业技术快速发展，让反应堆更快、更好、更容易地走出去，助推中核梦、助力中国梦。中国原子能科学研究院拟联合各大科研院所、大专院校、企事业单位、成立“数字反应堆联盟”（以下简称联盟）进行数字反应堆领域的基础科研攻关。利用信息化手段引领反应堆技术的发展，成就数字反应堆在工业 4.0、中国制造 2025 中担任更加重要的历史使命，为创建经济、高效、安全的新型反应堆工程技术研发创新体系而努力。

从人类认识世界的三种基本方法，即理论研究、实验验证和仿真模拟来看，随着高性能计算等技术的发展，数字仿真在人类认识世界的过程中发挥着越来越重要的作用。存在类似发展瓶颈问题的汽车与航空行业已有许多成功的仿真解决方案：利用虚拟样机技术设计的数字化汽车或飞机同复杂多变的虚拟试验环境结合起来，在设计的前期及时发现潜在的问题，进行调整修正、实现优化，具有节省资金、可重复性、无风险性等优点。可视化是帮助科研人员处理分析、理解仿真结果数据的重要手段，是仿真技术的重要组成部分。在常规工业已经早已出现的虚拟设计与制造、3D 制造和智能制造等在常规工业（如汽车工业、航空工业等）的应用表明，利用计算机这个工具可以创新性地促使生产力上升一个大大的台阶。核能行业借鉴此类方法，提出了数字化反应堆的概念。数字化反应堆、数字化核电厂，这是当前国际上核领域比较“时髦”的新概念，在国内有的还为“数字”还是“数值”争论，并未有统一的数字反应堆（核电厂）的公认的标准定义，本文列举如下几个定义：

- 数字反应堆就是充分利用计算机技术和仿真技术的发展成果，创新性地开发新的生产应用工具平台，这个平台应能够实现基于 CAD 的快速自动建模、科学可视化、虚拟现实技术和集成仿真等功能。
- 数字反应堆就是充分利用计算机及信息化技术手段，实现核电厂各项活动和物理特性的知识固化，利用计算机仿真技术和 3D 虚拟可视化技术，实现核电厂数字化模拟，并开发适用于核电厂设计、建造、调试和运行各阶段的应用软件。其最终目标是利用计算机技术实现核电厂数字化设计、建造、调试和运行。
- 数字反应堆就是运用计算机信息技术和高精度模拟分析技术，对反应堆进行全方位模拟，使之具有可视及可操作性等，以完成反应堆现实的或超越现实的研究，是未来核能系统的先进研究平台。
- 数字反应堆是基于高耦合、高保真、高可用的建模仿真技术，利用高性能计算机和先进数字计算方法，建造完全由计算机软件组成的核反应堆；数字反应堆可实现反应堆物理、热工水力、燃料组件及材料、反应堆水化学、结构力学、安全分析等模块多物理多尺度耦合精细化模拟，基于此可开展现役压水堆核电站的各种工况模拟、事故分析、安全评价、部件及材料性能预测等研究，以实现反应堆安全性能提升、功率提升及延寿、新堆设计等总体目标。
- 数字反应堆就是利用计算机数字化技术，对核电厂设计、建设、运行、退役和

废物处理全过程的真实世界的“资产管理”范畴的生产过程，进行基于物理现象的虚拟仿真，并集成数字环境的“知识管理”范畴的生产过程的虚拟仿真验证平台，用以验证、评估、优化核电厂生产工艺过程。

- 数字化反应堆是在超大规模高性能计算系统内，模拟反应堆全生命周期各种特性的集成数字仿真模拟对象。通过它可以在集成的研发平台上进行物理、热工、燃料、结构等多专业高精度的计算分析，实现多专业耦合协同设计，能够综合模拟、预测真实反应堆从设计、制造、运行到退役生命周期各专业性能、参数、行为等特性。

归纳上述不同的概念定义，都有这些关键词：HPC、仿真（模拟）、精细化、耦合、预测、验证等，因此本文总结并定义数字堆的概念如下：数字反应堆是可实现反应堆全周期各种物理过程的可靠量化预测和虚拟展示的系统集成平台，是未来反应堆发展的主要手段之一。数字反应堆利用高性能计算机数字化技术，对核反应堆的设计、建设、运行维修、退役和废物处理全过程的真实世界的生产过程，进行基于物理现象的高耦合、高保真、高可用的精细化建模模拟仿真，并集成数字环境的“知识管理”范畴的生产过程的虚拟仿真的研究与验证平台，用以研究、验证、评估优化反应堆生产过程，以减少实验验证，降低投资并加快研究建设进度。

鉴于数字反应堆的重要性，国际上针对数字反应堆开展了大量的研究，以美国和欧盟为代表的西方国家在该领域已取得重要进展。下面分别就美国、欧盟、英国的现状进行论述。

## 2 国内外调研与技术分析

### 2.1 美国发展现状

自 2009 年以来，美国启动了 2 个与数字反应堆紧密相关的大型科研项目：CASL（Consortium for Advanced Simulation of Light Water Reactors）项目、NEAMS（Nuclear Energy Advanced Modeling and Simulation）项目，其中 CASL 以现役轻水堆为主要研究对象，第一期自 2009 年至 2014 年，投资 1.22 亿美元；第二期自 2015 年启动，投资 1.25 亿美元。NEAMS 项目则针对下一代反应堆的设计和研发在 E 级计算机上开展研究。目前 CASL 项目进展最大。

#### 2.1.1 CASL 项目

为了重塑美国在核能研发领域的领导力，美国能源部 (DOE) 核能办公室于 2010 年成立了核能先进仿真建模中心（A DOE Energy Innovation Hub for Modeling and Simulation of Nuclear Reactors），以发展核能数字仿真技术。该中心将利用仿真与建模的方法完成下列关键目标来实现其改善现有核能运营的目的。

在工程设计、分析中利用顶级计算能力实现提升反应堆功率，延长寿命，提高燃耗的目标；用高精度的方法（如利用中子输运和 CFD 替代扩散理论和子通道方法），为工程分析开发一个高度集成的、多物理耦合的仿真建模环境；通过在 CASL 项目中

直接使用先进的建模仿真方法来培养和培训反应堆工程师；用具有预测功能的工具替代之前基于经验的设计和分析工具，以此提升基础科学能力；结合不确定性量化(UQ)方法，并将其作为开发具有预测功能的数字反应堆工具的重要基础；使 NRC 能够借助并利用 CASL 的数字反应堆工具支持执照申请及认证工作；CALS 项目将重点研究先进模型应用(AMA)，虚拟反应堆的集成(VRI)，模型和数字方法(MNM)，材料性能和优化(MPO)，不确定性量化和验证(VUQ) 5 个关键技术领域。CASL 功能架构如图 1 所示。

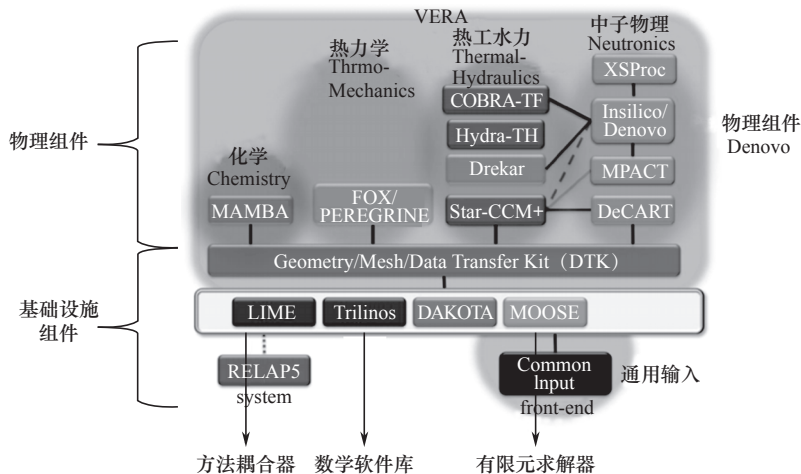


图 1 CASL 功能架构

CASL 成立是为了提供前沿的建模及模拟技术，来为美国现役轻水堆核电厂的功率提升和延寿提供帮助。基于此目的，CASL 团队开发了 VERA(Virtual Environment for Reactor Applications) 软件平台。VERA 是 CASL 团队的核心成果，是一个软件集，主要特点如下。

- VERA 主要有两大类软件：物理组件（Physics Component）——数字堆模拟中会用到的一些独立的、集成的、多物理应用程序；基础设施组件（Infrastructure Component）——为了物理组件能被有效使用，VERA 包含了基础设施组件及开发环境。
- 环境需求：32（或更多）核以上集群，Linux OS；GNU 编译器，MPI wrapper，SVN、Cmake 等。
- VERA 将其最核心的部分圈起来，称为 VERA-CS（VERA Core Simulator）。
- VERA-CS 是一些用在 LWR 模拟上的多物理代码的集合。这些物理代码包括：横截面、中子输运、热工水力、燃料性能、损耗等。
- VERA-CS 的目的是为 CASL 的主要解决问题提供数据、边界条件及模型。
- VERA-CS 的一个重要性能就是，它使用一个通用输入文件来使用所有不同的物理代码。

VERA 功能架构如图 2 所示。



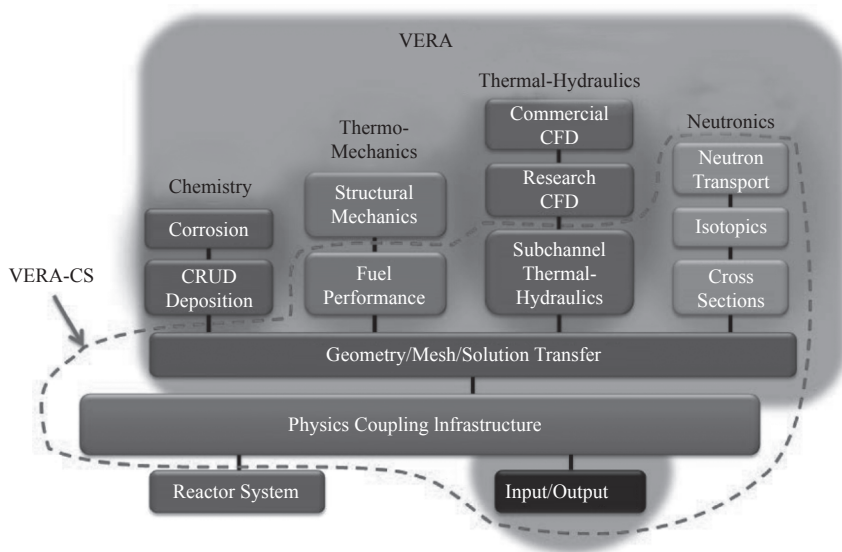


图 2 VERA 功能架构

CASL 项目的短期目标是，利用 VERA 环境中集成代码模拟解决限值 PWR 反应堆性能的关键问题，同时对模拟数据进行实验验证，保证其可靠性。目前 CASL 项目正针对锆包壳的腐蚀沉积、辐照蠕变、热工水力和粒子输运耦合、燃料棒性能分析、材料性能等问题展开研究，并针对模型和算法进行不确定度分析和验证。

项目的中期目标是，利用 VERA 环境对核电站操作和安全阈值进行非同步、非实时（脱机）模拟分析，输入核电测量和观察的数据，如流量轨迹、冷却剂化学成分、温度和压力、燃料 / 包壳 / 积垢未辐照检验的参数，VERA 模型就可以重现上一燃料循环周期的状况，或预测下一燃料循环中反应堆芯 / 燃料 / 包壳 / 积垢的演化。

项目的长期目标是，基于 VERA 的虚拟反应堆来在线实时监测反应堆操作和安全阈值。VERA 会不断与核电站监测交互，利用数据同化技术对模型进行校正，使其可高可信地预测安全阈值。利用 VERA 的高度洞察力，核电站业主可以优化堆芯装料方式、维护和操作过程 [包括紧急事故操作过程 (Emergency Operating Procedures, EOP)]。CASL 计划的实施对美国核电设计起到了积极的促进作用。

据《国际核工程》杂志 2014 年 5 月报道，作为轻水反应堆先进仿真联盟 (CASL) 计划“VERA 试验台架”项目的研究示范内容，西屋公司利用 CASL 开发的反应堆先进建模与仿真技术对 AP1000 首炉料堆芯启动开展模拟，模拟结果与连续能量蒙特卡罗计算结果具有高度一致性。

为了能将开发的新技术转让给外部利益相关者，CASL 计划通过“VERA 试验台架”实现研究成果的及早应用。2013 年，CASL 计划选择了西屋公司提供首个试验台架。VERA 试验台架是将 VERA 安装在西屋公司的计算机集群上，它包括 608 个处理器核心和 5.6TB 的内存，用于演练并改进 VERA 代码的安装、构件和升级过程，并帮助简化这一过程。目前，西屋 VERA 构件已经全面运行和试用。



西屋公司利用 VERA 试验台架对 AP1000 反应堆首炉堆芯的启动过程开展了模拟。AP1000 反应堆首炉堆芯设计与以往设计相比具有更为精细的模拟, 采取了新的燃料分区方案, 能够更加有效地利用燃料, 并采取机械补偿 (MSHIM) 的运行与控制策略。MSHIM 把反应性控制主要交给控制棒, 不需要持续改变冷却剂硼酸浓度的额外系统。MSHIM 能以最低的冷却剂可溶硼浓度实现很好的堆芯反应性控制和径向功率分布控制。

### 2.1.2 NEAMS 项目

核能先进仿真与建模 (Nuclear Energy Advanced Modeling and Simulation, NEAMS) 是美国能源部核能办公室在 CASL 项目后, 成立的另一个核能先进仿真与建模项目, 旨在为先进反应堆及核燃料循环系统的分析和设计开发一套具有预测功能的计算机分析程序。通过利用先进的计算方法开发一套加快核能技术开发和应用的仿真工具包, 提升核能的安全性、经济性及资源利用的高效性。

工具包将能够模拟先进反应堆系统在试验装置中看不到的现象。NEAMS 项目开发一套从燃料芯块到电厂级的仿真能力, 以预测一系列核反应堆的运行安全及特性。由于钠冷快堆具有充裕的高质量数据供验证使用, 初期项目将主要应用于钠冷快堆技术, 如条件允许, 也会应用到其他堆型。

NEAMS 项目的目标是基于多尺度模拟方法, 为新堆设计以及燃料循环体系开发建立分析计算软件, 旨在设计、分析核电厂及反应堆燃料的行为和安全性。其大致思路如图 3 所示。NEAMS 项目包括四个部分——MARMOT、BISON、SHARP、RELAP-7, 分别对应于燃料芯块、栅元、堆芯和全堆的模拟分析程序。

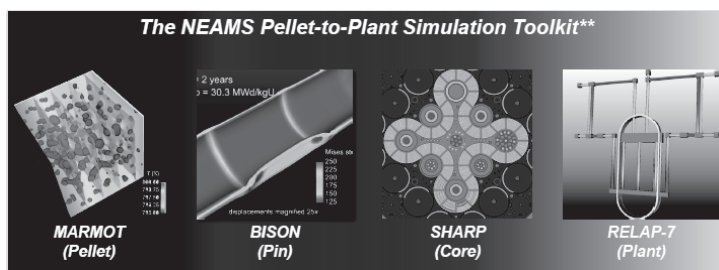


图 3 NEAMS 项目的技术思路

为了提升实用性及研发效率, NEAMS 项目重点开发两个不同级别 (不同尺度) 的产品系列——燃料级产品线 (Fuel Product Line, FPL) 和反应堆系统级产品线 (Reactor Product Line, RPL), 如图 4 所示。FPL 重点研究组成燃料及燃料包壳的材料性质。RPL 则重点开发一个设计工具来研究整个反应堆系统。通过耦合 FPL 和 RPL, 可提供一个全新的高精度解决问题的方法, 实现“从芯块到工厂”的跨越。NEAMS 将能够模拟先进反应堆系统在试验装置中看不到的现象, 以预测一系列核反应堆的运行安全及特性。

FPL 包括芯块软件 MARMOT 和燃料棒软件 BISON, RPL 软件包括堆芯软件 SHARP 和系统分析软件 RELAP-7。MARMOT 即 Mesoscale Material Model Development Tool, 介观尺度材料模型开发工具, 可模拟燃料在辐照下的微观结构演化。BISON 是

工程尺度的燃料行为工具，用于对 LWR、TRISO 和金属燃料 2D 或 3D 建模，模拟广泛操作和服务条件下的核燃料物理特征。BISON 包含裂变产物、燃料裂解、燃料包壳、冷却剂通道、热导及其他堆芯组件的演化、迁移模型，以预测完整燃料组件的行为。SHARP 是高保真的 3D 反应堆模拟架构，可评估反应堆性能及安全性设计变化的影响。SHARP 使用基于物理的经验方法，大幅降低了对工程模型校准的依赖。RELAP-7 即 Reactor Excursion and Leak Analysis Program。

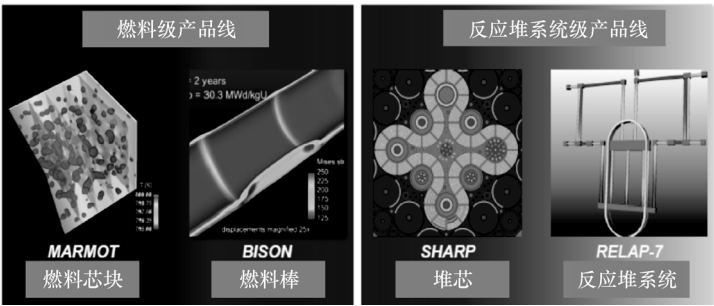


图 4 NEAMS 项目的两个产品系列

图 5 所示是 NEAMS 项目开发的集成计算环境。其中各部分模块的功能简介如表 1 所示。用户通过集成计算环境用户界面 NiCE 进行模型建立、模拟计算、数据管理、数据分析。所有计算程序均在面向对象多物理仿真环境（Multiphysics Object Oriented Simulation Environment, MOOSE）下开发。用于堆芯模拟的 SHARP 程序包包含 3 个主要模块：热工水力计算模块 Nek5000，中子学计算模块 PROTEUS 和结构力学模块 Diablo，各模块采用共同的网格数据库 MOAB，并由耦合器 CouPE 决定模块间的数据交换顺序。

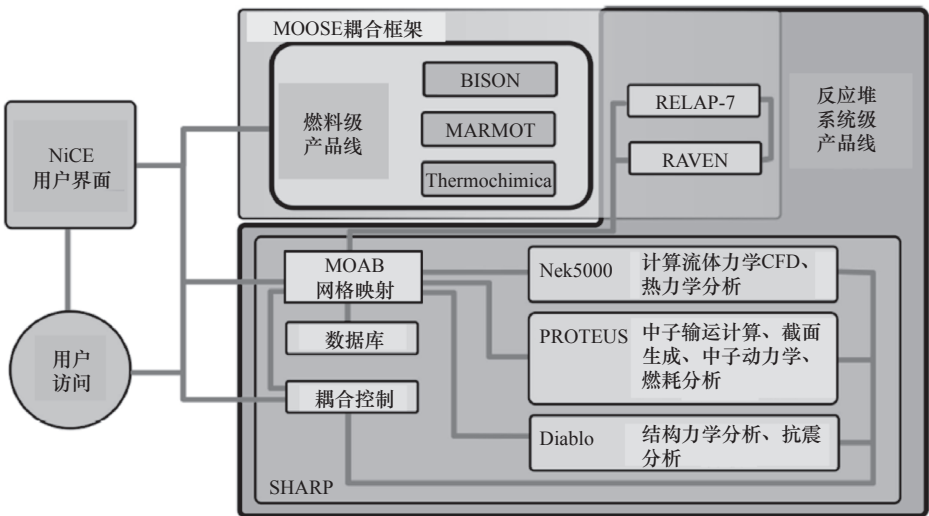


图 5 NEAMS 集成计算环境

表 1 NEAMS 集成计算环境各部分功能简介

名称	功能描述
NiCE	NEAMS 集成计算环境用户界面，可进行模型建立、模拟计算、数据管理、数据分析和可视化
VisIt	NEAMS 工具包中最主要的可视化程序，能够以多种可视化或动态化的数据（标量或矢量，二维或三维，结构化或非结构化网格）进行图形分析
MOOSE	多物理面向对象仿真环境（Multi-physics Object-Oriented Simulation Environment）是为解决非线性方程组耦合系统的并行计算框架，它有一个自适应的结构模块，能大大简化物理学的“kernels。”
FPL	模拟燃料的材料特性、化学行为，MARMOT（粒子级模拟）+BISON（工程级模拟）+Thermochimica（前两者的热化学性能）
RELAP-7	英文全称为 Reactor Excursion and Leak Analysis Program 与其他软件耦合，可模拟在各种操作和事故情况下完整的电厂情况
RAVEN	英文全称为 Reactor Analysis and Virtual Control Environment，是使用 RELAP-7 进行风险管理评价时的用户接口
MOAB	<p>网格化数据库（Mesh-Oriented dAtaBase, MOAB）基于高度可扩展的网格模拟数据管理底板（back-plane），用于在 SHARP 软件包的各物理模块间传递数据。</p> <p>在多物理模拟过程中，需要在不同物理模块间建立数据映射，即各物理过程模拟结果需要通过一个协调接口共享数据。</p> <p>这个接口由面向网络的数据库 MOAB 提供。它允许在独立网络上模拟不同物理过程，并允许它们共享结果。MOAB 作为数据基础与不同空间分布的物理过程建立连接。</p> <p>MOAB 与先进千万亿次模拟 iMesh 接口间可协调。MOAB 提供共性并行网格操作，例如并行输入、输出，并行记忆交换，数据交换，处理器间网格和元数据的发生和接收</p>
CouPE	耦合器（Coupled Physics Environment, CouPE）执行并控制 SHARP 程序包中各物理模块之间的数据交换顺序
MC2-3	用于快中子谱和多群截面计算的软件，是 PROTEUS 主要的截面生成工具
SHARP	高精度三维反应堆堆芯模拟框架（Simulation for High-efficiency Advanced ReactorPrototyping, SHARP）用于评估设计参数的变化对反应堆安全性的影响，其采用基于物理的方法，减少了对工程模型的依赖性
Nek5 000	SHARP 中的多维传热和流体力学计算软件
PROTEUS	SHARP 中的中子学计算模块，通过对裂变反应的模拟得到温度和功率水平，有两种方法：离散坐标法（PROTEUS-SN）和特征线方法（PROTUES-MOC）
Diablo	SHARP 中的结构力学模拟工具，用于估计反应堆结构的应力和形变，与 RELAP-7 结合评价地震影响

从 FPL 到 RPL 采用多尺度模拟方法。以裂变气体释放为例（见图 6），首先是裂变气体原子在 UO<sub>2</sub> 中扩散与形核长大，晶间气泡分解，以第一性原理（DFT）和分子动力学（MD）方法研究；其次是 Xe 的偏析，形成团簇与气泡形核，以 MD 和动力学 Monte Carlo（KMC）方法研究；再次是气泡长大并融合，以相场理论研究；最后是多晶网格中的渗漏，采用渗漏分析法分析。

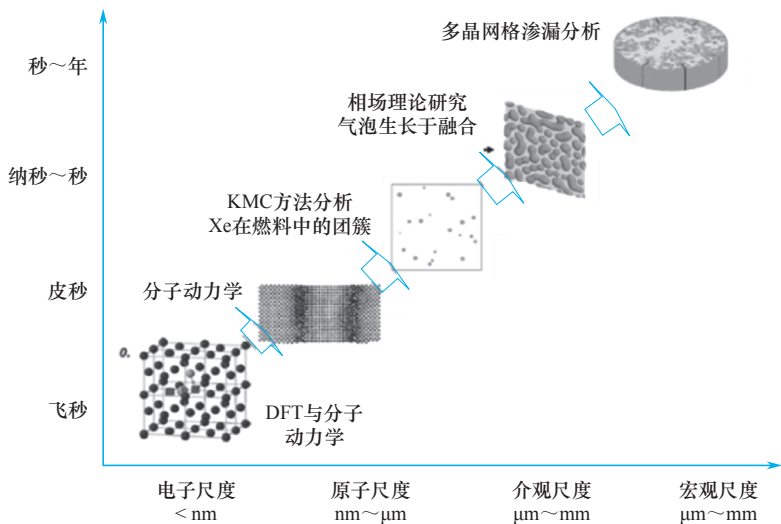


图 6 裂变气体释放多尺度模拟示意图

NEAMS 将分三个阶段陆续推出：2014 财年，该项目将发布氧化物燃料建模工具；2015 财年，一个早期版本的反应堆工具将允许专家用户对钠冷快堆中有限组问题进行建模；2018 财年，项目会发布完整的 NEAMS 工具包 1.0，集成全部两条产品线，用于从稳态操作到事故方案等条件下的全厂建模。集成组件的开发与之同步，以支持上面提到的 NEAMS 工具包的主要版本。贯穿该项目，建模方法及其执行会评估和验证，以信赖该工具包的可靠性并助益后续开发。

图 7 是 NEAMS 耦合架构设计，用户通过集成计算环境用户界面 NiCE 进行模型建立、模拟计算、数据管理、数据分析。所有计算程序均在 MOOSE 环境下开发。用于堆芯模拟的 SHARP 程序包包含 3 个主要模块：热工水力计算模块 Nek5000，中子学计算模块 PROTEUS 和结构力学模块 Diablo，各模块采用共同的网格数据库 MOAB，并由耦合器 CouPE 决定模块间的数据交换顺序。

2.2 欧洲发展现状

欧洲国家发展核能数字反应堆技术的主要代表项目是 NURESIM 系列项目。NURESIM 系列项目是由德国、法国等 13 个欧洲国家和 20 多个组织联合支持的项目，旨在建立一个供欧洲核反应堆仿真通用的参考平台，该项目属于欧洲核能技术平台可持续发展（SNETP）战略规划的部分内容。NURESIM 平台系列项目的发展路线，分为早期阶段、NURESIM 项目阶段、NURISP 项目阶段、NURESAFE 及 NURE-NEXT 项目阶段等。

早期阶段：在 NURESIM 系列项目早期阶段（2000—2004 年），EUROFASTNET 分析了当时热工水力软件的发展水平，鉴别出当时模型和程序的局限性，根据当时核工业界提供的相关信息，优先梳理了 44 项工业需求，并以此为基础开展了详细的科学研究。

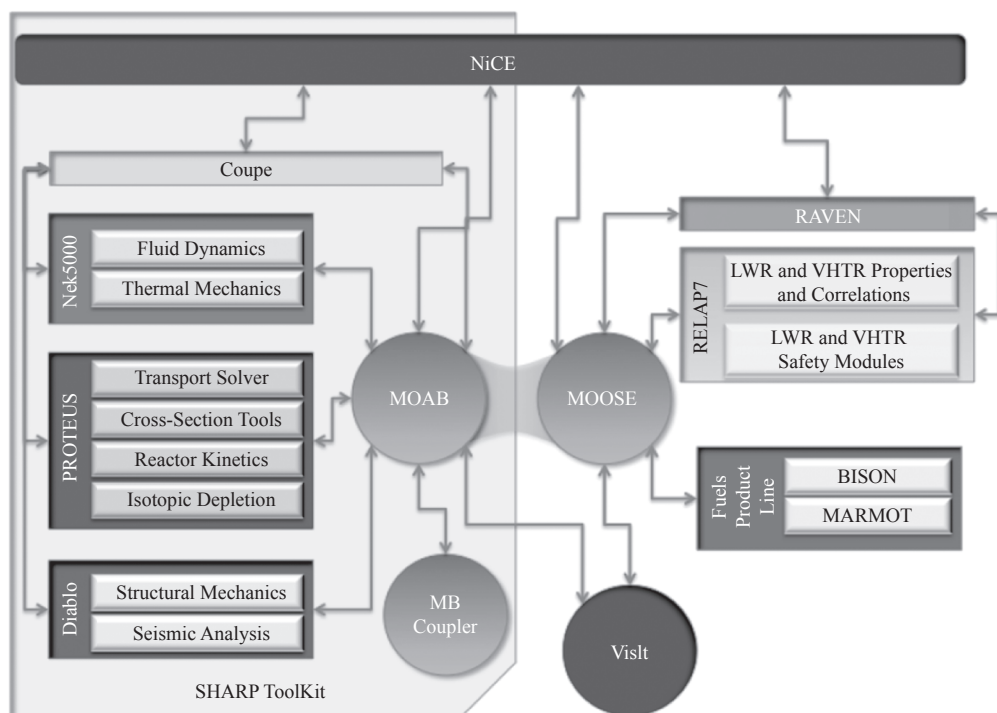


图 7 NEAMS 耦合架构设计

NURESIM 项目阶段：NURESIM（2005—2008 年）在 EUROFASTNET 项目热工水力程序研究的基础上拓展到堆芯物理、多物理场耦合、敏感性及不确定性分析、平台集成等领域。作为集成项目，NURESIM 的主要目标是建立欧洲的集成平台原型，证实 NURESIM 计划方法的可行性。NURESIM 平台通过更新并集成先进的堆芯物理，热工水力、燃料模块为真实物理现象提供了一个准确的仿真平台，其具有多尺度、多物理场的特征，特别是在提升反应堆安全性方面耦合了堆芯物理和热工水力模型。使用通用的数据结构和接口功能使不同程序和求解器之间的耦合变得很容易。为了用户使用性更友好，平台通过一个开放源代码的 SALOME 软件提供了前处理、后处理以及监视等功能。NURESIM 项目包括堆芯物理、热工水力、多物理场耦合、敏感性及不确定性分析以及平台集成五个子项目。该项目的主要成果是开发了一个通用的平台，初步集成了多个专业的软件，迈出了建设通用参考平台的第一步。

NURISP 项目阶段：在 NURESIM 项目完成后，在其基础上又规划了 NURISP 项目（2009—2012 年），NURISP 在 NURESIM 平台基础上集成了新的程序，并在平台集成、模型开发、耦合技术、不确定性分析及验证方面使用了新的方法，进一步拓展、完善了 NURESIM 项目的平台。在 NURESIM 五个子项目的基础上增加了网络通信子项目。NURISP 项目的平台主要应用是在二代及三代压水堆、沸水堆及 VVER 堆型中，并适当考虑了四代堆型的适用性。

NURESAFE 及 NURE-NEXT 项目阶段：继 NURISP 项目后的发展统称为 NURE-NEXT 项目，主要目标是通过与用户保持紧密联系，使 NURESIM 项目开发的平台实现



工业应用，并与欧洲核能技术可持续发展平台（SNETP）的战略规划保持一致。典型的应用是 2011 年福岛事故发生后，各组织机构在 NURESIM 的平台基础上确立了核反应堆安全仿真平台 NURESAFE（2013 年至今）研究项目。NURESAFE 项目成立的初期目标是在 NURESIM 及 NURISP 项目发展的平台基础上，利用最先进的仿真工具，针对欧洲用户的安全分析需要，开发一个可靠的用于轻水堆事故分析的仿真平台。随着更多用户的加入（如 AREVA、ENEA、NCBJ 等），NURESAFE 的目标提升到为终端用户开发、验证、交付一个用于轻水反应堆安全分析、运行和工程设计的综合集成应用平台 Salome 如图 8 所示。该平台将用更高的精度和可靠性来增强安全相关参数的仿真预测能力。同时，集成到平台上的单个模型、求解器、程序以及耦合功能将通过模拟运行核反应堆相关运行工况序列与实验及电厂数据进行验证。主要的运行序列将包括：PWR 和 VVER 堆型的主蒸汽管破裂（MSLB），PWR 堆型的 LOCA 和承压热冲击（PTS），BWR 堆型的未能紧急停堆的预期瞬态（ATWS）及热工水力问题等工况和序列。在运行这些序列时，平台将会耦合多物理、多尺度的程序，如系统热工水力程序、局部流体动力学程序（CFD）、中子动力学程序、子通道程序、燃料热力学等程序。同时，进行不确定性量化和敏感性分析。

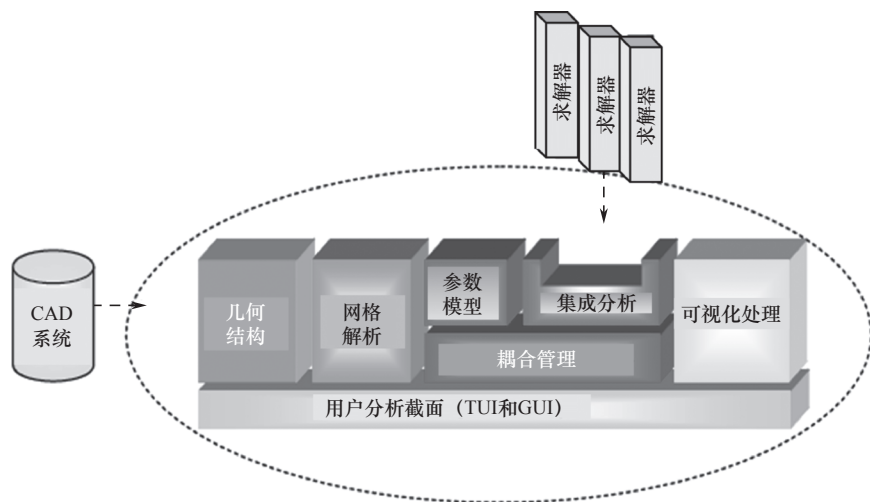


图 8 Salome- 集成 (Integration) 模块成果

Salome 平台主要由以下部分构成。

- SP1 (Core Physics) 堆芯物理：在一个新的标准下，为反应堆堆芯物理整合最先进的软件（主要包括物理建模和数字技术），主要包括蒙特卡罗——执行耦合热工数据 / 中子学或耦合损耗 / 中子学计算，中子动力学——轻水反应堆中的 3D 全堆芯中子学热工水力的节点仿真。
- SP2 (Thermalhydraulics) 热工水力：在计算流体动力学中，对于发生在核反应堆中的两相热工水力有两个关键点——高压热冲击（PTS）和临界热通量（CHF），通过验证模型与实验数据、新特定模型、小尺度模拟等方法来实现模拟。

- SP3 (Multiphysics) 多物理耦合：本分部工程的主要目的是实现和测试可用的中子学的和热工水力学动力学之间的耦合，主要定义包括界面结构和数据交换方式的耦合方案。
- SP4 (Sensitivity and Uncertainty Analysis) 敏感性和不确定性分析：对“堆芯物理模块”及“多物理耦合模块”进行敏感性和不确定性分析。
- SP5 (Integration) 集成：目的是整合 SP1 ~ SP4 模块来开发平台的通用函数。
- code\_aster (Fortran、Python)：是法国电力公司 20 年来一直致力于研究的结构分析的数字模拟软件。既可用于内部实验的验证，也可用于维护发电厂和电力网络。适用范围很广泛，如机械、土木工程结构、压力容器等，其擅长非线性模拟。建立数字模型使用的是 EDF 自己的力学研究成果，主要有疲劳、损伤、土工材料、多孔介质、多物理耦合等。
- Code\_Saturne：是一款通用计算流体动力学 (CFD) 软件。可以在二维、二维轴对称和三维多种体系下进行模拟。包括稳态和非稳态，层流或湍流，等温或不可压缩和弱膨胀流动、标量输运等。主要用于天然气、煤和重油燃烧，半透明的辐射传输，焦耳效应，电弧，弱可压缩流，大气的流动等方面。
- Salome (Python，应该和 NURESIM 项目里提到的是同一个) 提供了数字模拟的前处理和后处理的通用平台。允许模拟所有物理现象的具体表现（机械、热工水力、中子）及其相互作用，提供了多物理场的耦合计算。可以通过软件直接与 CAD 建模相连，提供了一个友好便捷的用户界面。

### 2.3 MOOSE 计算环境

基于支撑框架研制应用软件已成为国际主流（例如，NEAMS 和 CASL 计划中的 MOOSE, MOAB 框架等），无论是在美国 CASL 项目中，还是在 NEAMS 项目中，都采用了基于 MOOSE 的耦合计算方法。MOOSE (Multi-physics Object-Oriented Simulation Environment) 计算框架由美国爱达荷国家实验室提出，是一种非线性方程组耦合并行求解框架。它最初的目的是用于核能源相关的工程应用，现在已被应用到许多科学与工程领域，包括材料微观组织的演变、化学、地质力学、超导、计算流体力学、固体力学、热传导、中尺度材料建模等。目前已被 50 多个大学、国家实验室、国际研究机构使用。MOOSE 框架的功能主要有：高度耦合、高度封装的多物理解决方案 (Fully-coupled, Fully-implicit Multi-physics Solver)；即插即用的接口 (Plugable Interfaces Allow Specialization of Every Part of the Solver)；网格适配器 (Built-in Mesh Adaptivity)；并行多尺度解决方案 (Intuitive Parallel Multiscale Solves)；自动并行处理 (Automatically Parallel Largest Runs >100 000 CPU Cores)。

在反应堆燃料性能 (Reactor Fuel Performance)、轻水堆中冷却剂流动建模 (Coolant Flow Modeling in Light Water Reactors)、球形床反应堆热量 (Heat Flow Through a Pebble Bed Reactor) 等的模拟过程中，非线性差分方程组经常出现，MOOSE 的出现主要是为了解决这类问题；根据 Jacobian-free Newton-Krylov (JFNK) 数学原理，把要求解的物理表达式模块 (Modurized) 定义为 “kernels”；然后用户定义的 kernel 继承

MOOSE 中已有的 kernels 基类，用有限元方法来求解方程。其求解原理图在 MOOSE 结构图中展示，如图 9 所示。

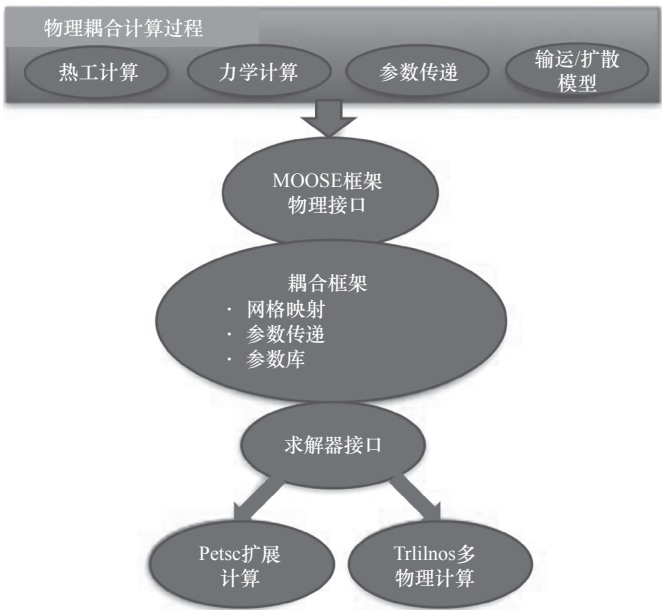


图 9 MOOSE 结构图

使用 MOOSE 解决一个物理问题时，需要用户提供 1 个输入文件和 6 个组件，输入文件中应包含对组件的描述信息。其中，输入文件是以分层的块结构来组织的（类似于 XML）。MOOSE 已经定义好了 6 个基本块：

- [Mesh] 指明问题的几何结构，可以是一个文件。
- [Variables] 定义待解的未知量。
- [Kernels] 问题领域物理的实现（是用户编写的类，里面封装的是以有限元方法解 PDE 的函数，需要继承 Kernel 类）。
- [BCs] 问题边界条件的实现（也是类，DirichletBC 类的继承图）。
- [Executioner] 指明如何求解问题（Executioner 类）。
- [Outputs] 指明输出的格式和变量。

2.4 中英合作 INDE 项目

随着 2014 年国家主席习近平在欧洲和阿根廷推广中国核电，中国核电“走出去”战略成为国内外关注的焦点。李克强总理在 2014 年 6 月访英期间，中英双方就核电等领域签署《联合声明》，英方欢迎中国企业继续在英投资核电、高铁等项目。6 月 18 日，中核集团参加了中国国家能源局与英国能源与气候变化部共同举办的中英能源对话，并与英国国家核实验室签署了《科研合作谅解备忘录》。

数字核电厂在我国也引起了科学家以及政府部门的高度重视，中核集团龙腾计划中就专门设定了“数字核电厂”项目，其目标为：以数字化综合研发平台为基础，完成

华龙一号数字化核电厂的开发，具备“全流程、全寿期、全三维、全仿真”的主要特征和功能。第一期资助 3 400 万元，第二期正在申报当中。此外，中国原子能科学研究院申报的数字反应堆相关课题“反应堆关键材料性能优化软件系统研制”也获得了科技部 863 计划的资助，将针对数字反应堆总体架构设计以及关键材料服役性能高性能模拟开展研究。

2014 年 6 月 17 日，在李克强总理和卡梅伦首相的共同见证下，中国国家原子能机构主任许达哲、英国能源与气候变化部大臣爱德华·戴维、中核集团总经理钱智民、国际核能服务公司总裁马克·杰维斯，分别代表四方签署了《关于加强民用核工业燃料循环全产业链合作的谅解备忘录》。根据该合作谅解备忘录，中英两国将进一步深化在核燃料循环全产业链的合作。在中英合作框架下，英方提出与中方联合开发“数字核电厂”（Integrated Nuclear Digital Environment, INDE），如图 10 所示，英方提出优先开展其中的数字反应堆部分联合研究。鉴于此，中核集团成立了“数字反应堆”小组负责与英方开展合作研究，该工作小组由中国原子能科学研究院担任组长单位（组长柳卫平副院长），中国核动力研究设计院和中国核电工程公司为成员单位。

## INTEGRATED NUCLEAR DIGITAL ENVIRONMENT (INDE)

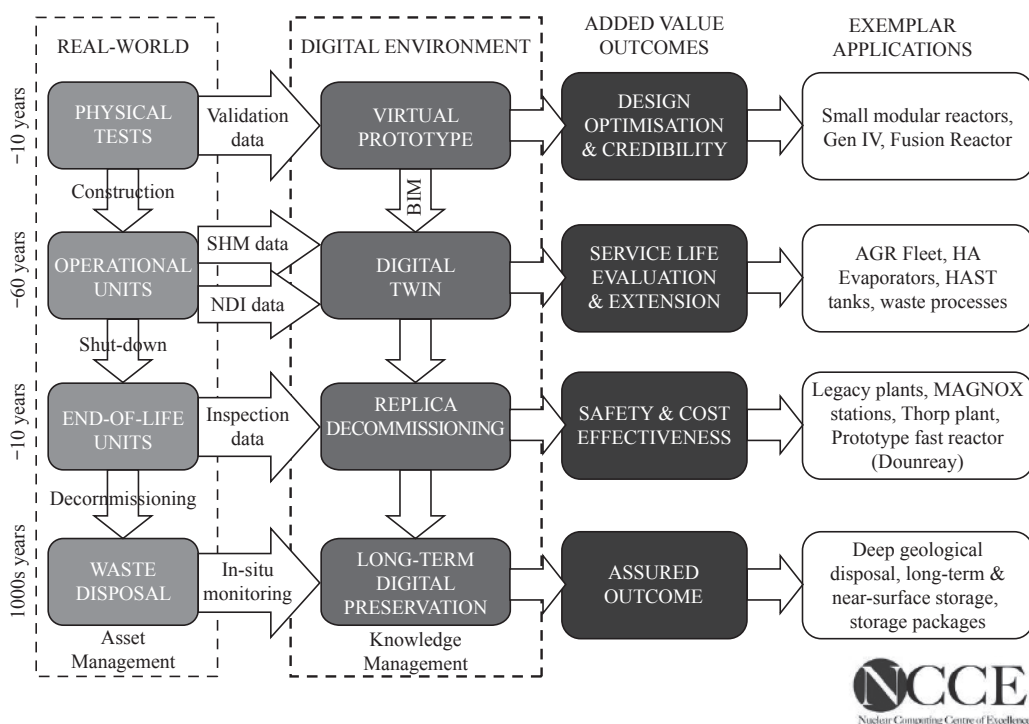


图 10 英方提出的数字核电厂总体框架

INDE 项目提出了一种核电厂原型堆的数字环境概念框架，涉及从设计验证优化、运行、退役到废物储存的全部物理过程，由一系列相互连接的多尺度、多物理计算模型组成。INDE 的发展将依赖于未来高性能计算机系统的发展程度。

## 2.5 中核集团 NESTOR 软件包

2015 年 12 月 17 日上午,中国首套自主核电软件包和一体化软件集成平台(NESTOR)正式发布。2010 年,在中核集团的统一部署下,依托龙腾 2020 科技计划,核动力院、工程公司、中核武汉核电运行技术股份有限公司等单位组成研发团队,由核动力事业部组织实施,成体系地开展了核电软件开发工作,瞄准解决三代核电软件自主化问题,以“华龙一号”工程为依托,为其量身定做开发出 NESTOR。作为成套的核电软件产品,其内容涉及物理设计、屏蔽和源项设计、热工水力设计、安全分析、燃料元件设计、系统与设备设计、核电厂运行支持,以及工程管理等多个专业领域,将有效提高核电工程设计、建设、运行效率与质量,为下一代新堆型研发提供技术储备,为实现数字化、定制化和智能化的核电站研发和设计技术革新奠定基础。

目前,NESTOR 软件包计划研发软件(包括已经研制完毕的软件)近百余个,已完成研发软件 68 个。其中,获得软件著作权 64 项,专利已受理 17 项,已授权 5 项,源代码 280 万行。目前,NESTOR 软件包已成功应用于“华龙一号”示范工程福清 5 号、6 号的反应堆工程设计工作中。

## 2.6 分析与总结

分析上述调研材料,高性能计算,多物理、多尺度耦合计算框架,可视化建模,不确定度分析是数字反应堆的关键技术。美国、欧盟均部署大量的人力和材料开展了相关研究计划,其目的是通过先进的数值模拟,尽量真实地还原反应堆内的物理过程,从而为发掘潜力、提高反应堆性能服务主要包括:反应堆升功率、延寿以及降低成本;增加燃耗降低核废料量;对运行或事故全过程进行模拟预测,以确保安全。我国数值反应堆的研究还处于起步阶段,许多单位都开展了相关研究,中国原子能科学研究院的数字微堆项目是数值反应堆技术发展重要节点。项目于 2016 年 7 月 27 日,在国际原子能机构(IAEA)、国家原子能机构(CAEA)和参与国际微堆低浓化应用大会各国嘉宾的见证下发布,标志着我国已经掌握了数字微堆技术,也标志着中核集团在数字反应堆技术开发领域取得了重要突破。另外,中国科学院核能安全技术研究所 FDS 团队做过这方面的尝试,建立了虚拟聚变堆系统 VFS,北京应用物理与计算数学研究所、清华大学工程物理系核能科学与工程研究所等单位也致力于研发用于反应堆堆芯物理输运计算的蒙特卡罗模拟程序和通用并行框架系统。

# 3 原子能院数字堆规划

2016 年,我国的神威·太湖之光计算机峰值速度达到 125PFlops,成为计算机 TOP500 的第一名,实现了芯片的自主化,这是继天河-II 之后,我国计算机取得的又一大成果。我国计算机硬件的快速发展,为反应堆的高分辨率数值模拟奠定了坚实硬件基础。借助于国际领先的高性能计算能力、反应堆设计软件自主化过程中积累的核电数值模拟应用软件的某些方面已经达到国际先进水平,但整体差距仍然存在,需要统一规划、重点突破。



我国部分核工程研究机构也提出了数字化、智能化甚至智慧化的发展方向，并制定了相关规划。个别研究机构发布了压水反应堆核心计算机软件的自主化版本。部分研究机构已经投入经费配置和开发虚拟样机所需要的三维工程设计和沉浸式工程漫游所需的软件和硬件。但是，这些规划、方向或者自主化软件，由于还没有和超级计算技术、大数据技术以及高速数据传输技术相结合，还完成不了反应堆“虚拟样机”所需要的实时、高速的理论分析和超现实的工程模拟的需求。部分研究人员由于忽略了三大信息技术对数字反应堆的不可或缺的支撑作用，忽略了数字反应堆实际上真正反映的是企业的反应堆工程全方位技术研发经验和能力，甚至对数字反应堆提出了本末倒置的概念解读。

中国原子能科学研究院（以下简称原子能院）是我国反应堆工程技术的发源地和创新推动者，并被称为“中国反应堆的摇篮”。原子能院从 20 世纪 50 年代建成我国第一座反应堆开始，已经设计或建造了 25 座反应堆，积累了上百堆年的反应堆工程运行经验，并成功实现了我国首座反应堆的退役实施。21 世纪以来，原子能院一直在跟踪和推动信息技术给工程研究、设计和运行带来的契机，在反应堆工程设计软件、数据管理、协同设计等方面取得了重要进展。“十二五”以来，借助示范快堆专项工程，大力推动信息化基础技术的建设，搭建了 300 万亿次的超级计算中心、200T 大数据中心、高速网络传输系统的建设。在此基础上，开发了参数化协同平台、运维一体化平台、工程虚拟仿真中心、三维设计中心、工况模拟中心等平台系统，为数字反应堆型号的开发搭建了国内首屈一指的支撑平台系统。

2016 年 7 月 29 日，原子能院凭借其强大的信息化支撑系统、坚实的微型中子源反应堆全周期工程技术，率先成功开发并发布了数字微堆系统，初步展示了原子能院在数字反应堆领域的最新研究成果。数字微堆系统的成功发布也被搜狐、新浪、新华网、科技网、凤凰资讯等媒体争相报道。

更安全、高效的核反应堆对快速精准的堆芯理论计算、燃料和材料服役性能预测提出了迫切需求。基于先进耦合建模和大规模并行计算技术的数值反应堆已成为国内外领域前沿热点。数值反应堆不仅使上述需求成为可能，更为先进反应堆的设计优化、不同工况运行模拟优化、严重事故序列演示预测及燃料和材料研发提供了一个经济、高效的试验平台。

中国原子能科学研究院目前正在瞄准数值反应堆核心技术，自主开发堆芯物理、热工水力、结构力学、燃料和材料性能分析五套软件，建立面向核能行业开放共享的 E 级超算反应堆数值装置原型系统（简称原型系统）。主要包括：建立数值反应堆框架体系，明确各专业模块计算模型与算法及相互间的耦合规则和接口规范；研究面向 E 级计算可扩展并行算法与优化技术；开发反应堆物理、热工水力、结构力学、燃料元件和材料五套高精细模拟计算软件，以及它们之间多物理、多尺度、强非线性和流-热-固耦合应用软件系统；研究模拟验证及置信度分析的方法和技术，开展软件系统验证和数值堆原型系统典型示范应用。主要解决的关键技术有包括：总体架构与建模，建立数值堆框架体系，梳理出各模块间的逻辑关系，明确耦合规则，确定各模块间耦合接口规范，建立大规模、高精细反应堆物理、热工水力、结构力学、燃料元件性能分析及材料服役性能预测的数学物理模型。并行算法设计优化，以数学物理模型与总体架构为基础，研究

多层次通信优化。负载均衡和自动调优等优化技术，设计面向 E 级计算的可扩展并行算法。软件开发，完成具有自主知识产权的基于 E 级超算、先进耦合建模技术的数值堆原型系统。模拟验证与示范应用，依托独一无二的多堆型多反应堆及上百堆年运行经验和数据，开展各软件的分系统验证及整体耦合验证，并反复迭代优化软件，建立国内首个面向核能行业开放共享的数值堆原型系统。最后，以四代快堆设计分析开展典型示范应用。模拟达到 60 万核处理器核规模，并行效率超 30%。原型系统与国际典型同类型研究工作对比如表 2 所示。

表 2 原型系统与国际典型同类型研究工作对比

功能		CASL (一期 2009—2014 年)	NEAMS (2010 — 2020 年)	原型系统 (2017—2021 年)	对比结论
热工水力	模型	1. 子通道 (COBRA-TF 软件) 2. CFD 单相流 RANS, URANS, LES, DNS (Hydra-TH 软件) 3. CFD 多相流 (Hydra-TH 软件)	CFD 单相流 DNS、LES (Nek 5 000 软件)	1. 子通道 2. CFD 单相流 RANS, LES, 层流模型等	1. CASL 中 CFD 研究多相流, 原型系统只研究单相流, 多相流下一步研究 2. CASL、NEAMS 中 CFD 都不能做全堆模拟, 原型系统有望实现全堆模拟
	规模	1. 子通道可实现全堆模拟 2. CFD 单相流 3×3 燃料棒束, 4 千 7 百万网格 (十万核) 3. CFD 多相流模拟 3×3 燃料棒束, 约 2 亿网格 (3 万 6 千核)	模拟 217 燃料棒, 使用 20 亿网格, 52 万处理器 (IBM BG/Q)	子通道实现全堆芯、全通道、全工况模拟 CFD 网格超百亿	3. NEAMS 中 CFD 只包括 DNS、LES 模型, 原型系统与 CASL 还包括 RANS 模型
	研究问题	1. 研究 DNB 2. 与中子物理耦合研究 CRUD 3. 与力学耦合研究 GTRF/FAD	与力学、物理耦合研究燃料性能	研究全堆的流动传热问题 与力学耦合研究流致振动	4. CASL 和原型系统子通道都能进行全堆芯模拟, NEAMS 不研究子通道 5. 都能与物理等耦合
中子物理	模型	1. 确定论特征线法 MOC (MPACT, Denovo 软件) 2. 蒙特卡罗法 MC (Shift 软件)	确定论 (SN, SPN, MOC 方法)	确定论特征线法 MOC 蒙特卡罗法 MC	1. 原型系统比 CASL 计算规模大 2. 原型系统与 CASL 都使用确定论和蒙特卡罗方法
	规模	1. MOC 对栅元问题、组件问题计算 <sup>[9]</sup> 、对 Watts Bar Nuclear Unit 1 (WBU1) 进行基准测试 (MPACT 软件, 4 756 核超线程) 2. MC 对 C5G7 Rodded B 算例, 50 万粒子 (shift 软件, 24 万核)	三维 C5G7 问题每能群包括百亿未知量 (IBM Blue Gene/Q, 2 048 核)	1. MOC 计算以 CFR600 为算例模拟千亿特征线, 全空间临界浮点运算次数达 $2.04 \times 10^{20}$ 。 2. MC 计算燃耗区超百万、计数超千亿	
力学	研究问题	流致振动引起的磨损问题	与热工、物理耦合研究燃料性能	研究静力学, 流致振动, 磨损评估, 与模拟网格相比数超百亿	原型系统计算规模最大 原型系统与 CASL (都研究磨损及流致振动) 及 NEAMS (在燃料中考虑力学问题) 研究问题类似
燃料	模型	对热行为、裂变气体行为、机械行为紧耦合	热工、中子物理、结构力学软件松耦合 (SHARP)	中子物理、热工、变形、FGR 多模块耦合	CASL、NEAMS 均未实现对全堆芯的性能分析, 原型系统拟实现全堆芯的燃料性能分析

(续表)

功能		CASL (一期 2009—2014 年)	NEAMS (2010 — 2020 年)	原型系统 (2017—2021 年)	对比结论
燃料	维数	二维 (Peregrine) 三维 (BISON-CASL)	一维、二维、 三维	1.5 维	CASL、NEAMS 均能实现三维分析, 原型系统仅实现 1.5 维分析, 三维下一步研究 BISON 是在正常和事故工况下以工程规模模拟核燃料性能; 原型系统仅进行稳态分析
	功能	正常、非正常和事故条件下以工程规模模拟核燃料性能 (BISON)	稳态和缓慢瞬态现象 (SHARP)	稳态	
材料	模型	1. 密度泛函理论 (Bison 程序) 2. 晶体塑性有限元法 CPFEM (libMesh 框架)	基于密度泛函理论、相场理论等的低尺度模型 (MARMOT 程序)	1. 分子动力学 2. 动力学蒙特卡罗 3. 相场 4. 速率理论	1. CASL 和 NEAMS 只研究材料的微观尺度演化, 原型系统跨越微观、介观、宏观多尺度 2. CASL 和 NEAMS 中的材料模拟在燃料模拟下进行, 原型系统开发专门针对材料的模拟软件
	尺度	微观尺度	微观尺度	微观到介观, 粒子数超千亿, 自由度超万亿	
	研究问题	1. 燃料棒变化对包壳材料的影响 2. 由辐照、热循环、氢化、裂变产物演变引起的材料强度和延展性效应	由应力、温度和辐照引起的包壳材料结构和特性的变化, 一般与核燃料协同模拟	1. RPV 钢辐照脆化 2. 堆内构件辐照肿胀 3. 包壳吸氢	

对于未来反应堆数值装置的发展趋势和展望中, 中国原子能科学研究院根据数字反应堆对高分辨率计算的需求, 结合我国高性能计算能力的快速发展, 梳理了数字反应堆高精度模拟计算对高性能计算的需求趋势, 给出原子能院反应堆数值装置原型系统项目 (简称原型系统) 中的超算需求, 以及更为理想的高精细模拟对超算的需求, 为下一步数字反应堆技术的发展指出了方向 (见表 3)。

表 3 高精度模拟计算对高性能计算的需求趋势

关键问题	目前先进模拟水平	原型系统计算目标	原型系统超算需求	理想高精细模拟	理想高精度模拟超算需求
MC 全堆芯 pin-by-pin 输运计算	全堆芯 pin-by-pin、百亿粒子、网格 150 万 (JMCT, 12 万核, 天河 II)	三维全堆芯 pin-by-pin、耗区超百万、计数超千亿	约 10P 超算平台	全堆芯 pin-by-pin	以 CFR600 为例, MOC 全空间计算及存储如下: 需 E 级超算平台
物理 MOC 全堆芯输运计算	MOC 模拟 VHTR 问题, 超过 4 千万特征线 (MOCFE 求解器, Blue Gene/P, 6 万余进程)	超千亿特征线	约 100P 超算平台	万亿特征线, 能群数超 1 000	计算量 (400E 次浮点计算) $4.96 \times 10^{13}$ (单能群特征线计算次数) $\times 1\,028$ (能群数) $\times 50$ (内迭代) $\times 200$ (外迭代) $= 4.04 \times 10^{20}$ 浮点计算次数 存储量 (超 2 000TB) 747.2TB (精细燃耗分区) + 3.68 TB (常规通量存储) + 1 568TB (峰值通量存储) + 28.8GB (模块化特征线信息) $\approx 2\,319$ TB

(续表)

关键问题		目前先进模拟水平	原型系统计算目标	原型系统超算需求	理想高精细模拟	理想高精细模拟超算需求
热工	全堆芯高精度三维 CFD 模拟	单相大涡模拟，一个燃料组件 217 燃料棒及绕丝，20 亿网格（Nek5000 软件，IBM BG/Q，52 万余核）	百亿网格	约 50P 超算平台	全堆芯单相 LES 模拟	需 E 级超算平台 <sup>[6]</sup> ，网格量（超万亿）： 以快堆为例，以 Nek5000 计算需求为基础， $1 \times 10^{10}$ （单组件网格） $\times 364$ （组件数） $= 3.64 \times 10^{12}$ ，需万亿网格
	多相 DNS 模拟，雷诺数 43 000，20 亿网格，4 个子通道（ANL Mira，耗时 4.6 天，51 万余核）	多相 DNS 模拟，雷诺数使用接近真实情况的 500 000			以文献 [5] 在 Mira（约 10P）耗时 4.6 天模拟 4 个子通道为基准估算，以快堆为例： 一个组件需 100E 级超算平台模拟约 2 个月 $(500\ 000/43\ 000)^3 \times (17 \times 17/4) / (100\ 000/10) \times 4.6/30 \approx 1.7$ 全堆芯需 10Z 级超算平台模拟约 6 个月 $(500\ 000/43\ 000)^3 \times (17 \times 17/4) \times 364 / (10\ 000\ 000/10) \times 4.6/30 \approx 6.3$	
材料	RPV 辐照脆化模拟	MD 模拟 $4 \times 10^{12}$ 原子（CrystalMD，神威，624 万处核）	粒子数超千亿，自由度数超万亿	约 90P 超算平台	空间跨越从微观到宏观，时间跨越从皮秒到年多尺度，以微秒为单位直接模拟万亿亿原子	存储量（超 $10^{10}$ TB）： MD 与 KMC 紧耦合，以 Crystal MD 及 CrystalKMC 存储为例： 100B（MD 每粒子存储） $\times 10^{20}$ （MD 粒子数）+100B（KMC 每空位存储） $\times 2 \times 10^{17}$ （KMC 空位数） $\approx 10^{10}$ TB
	堆内构件辐照肿胀模拟	相场模拟 $2.15 \times 10^{13}$ cell（神威，1 000 万核）				

参考文献

[1] Moon-Hyun Chun,Kyong-Won Seo. An Experimental Study of Pressure Drop Correlation for Wire-Wrapped Fuel Assemblies[J], KSME International Journal, 2001, 15(3): 403-409.

[2] Franceschini, F., A.T. Godfrey, S.G. Stimpson, T.M. Evans, B.S. Collins, J.C. Gehin and J. Turner, “AP1000® PWR Startup Core Modeling and Simulation with VERA-CS,” Proceedings of the ANFM 2015 - Advances in Nuclear Fuel Management V, Hilton Head Island, South Carolina, March 29-, Volume ANFM 2015 CD, April 29, 2015, Hilton Head Island, South Carolina, 2015.

[3] Kochunas, B., D.R. Jabaay, S.G. Stimpson, A.M. Graham, T.J. Downar, B.S. Collins, K.S. Kim, W.A. Wieselquist, K.T. Clarno and J.C. Gehin, “VERA Core Simulator Methodology for PWR Cycle Depletion,” Proceedings of the ANS MC2015 - Joint International Conference on Mathematics and

- Computation (M&C), Supercomputing in Nuclear Applications (SNA) and the Monte Carlo (MC) Method, Volume ANS MC2015 CD, April 19, 2015, Nashville, Tennessee, 2015.
- [4] Mervin, B.T., M.L. Pytel, D.F. Hussey and S.M. Hess, "Pellet-Cladding Mechanical Interaction Analyses Using VERA," Proceedings of the ANFM 2015 - Advances in Nuclear Fuel Management V & CASL VERA Workshop, Volume ANFM 2015 CD, March 29, 2015, Hilton Head Island, South Carolina, 2015.
  - [5] Franceschini, F., A. Godfrey and J. Gehin, "AP1000® PWR Reactor Physics Analysis with VERA-CS and KENO - Part II: Power Distribution," Proceedings of PHYSOR 2014 International Conference, October 28, 2014, Kyoto, Japan, 2014.
  - [6] Franceschini, F., M. Kromar, D. Čalić, A. Godfrey, B.S. Collins, T.M. Evans and J.C. Gehin, Simulation of the NPP KRSKO Startup Core with CASL Core Simulator, VERA-CS, Proceedings of the International Conference Nuclear Energy for New Europe (NENE), September 1, 2014, Portorož, Slovenia, 2014.
  - [7] Palmtag, S., K. Clarno, G. Davidson, R. Salko, T. Evans, J. Turner, K. Belcourt, R. Hooper and R. Schmidt, "Coupled Neutronics and Thermal-Hydraulic Solutions of a Full-Core PWR Using VERA-CS," Proceedings of PHYSOR 2014 International Conference, October 28, 2014, Kyoto, Japan, 2014.
  - [8] Gehin, J., A. Godfrey, T. Evans, S. Hamilton and F. Francheschini, "Watts Bar Unit 1 Cycle 1 Zero Power Physics Tests Analysis With VERA-CS," Proceedings of PHYSOR 2014 International Conference, October 18, 2014, Kyoto, Japan, 2014.
  - [9] Franceschini, F., M. Kromar, D. Čalić, A. Godfrey, B.S. Collins and T.M. Evans, "Simulation of the NPP KRSKO Startup Core with CASL Core Simulator, VERA-CS," Proceedings of the International Conference Nuclear Energy for New Europe (NENE), September 8, 2014, Portorož, Slovenia, 2014.
  - [10] NEAMS executive program plan. <http://energy.gov/ne/downloads/nuclear-energy-advanced-modeling-and-simulation-neams-program-plan>.
  - [11] Advanced modeling & simulation. <http://energy.gov/ne/nuclear-reactor-technologies>.
  - [12] Predictive simulation. <http://energy.gov/ne/advanced-modeling-simulation/predictive-simulation>.
  - [13] Advanced nuclear reactors. <http://energy.gov/ne/advanced-modeling-simulation/advanced-nuclear-reactors>.
  - [14] NEAMS quarterly report for October-December 2013. <http://energy.gov/ne/downloads/neams-quarterly-report-october-december-2013>.
  - [15] Nuclear-fuels. <http://energy.gov/ne/advanced-modeling-simulation/nuclear-fuels>.
  - [16] SOLOME. The open source integration platform for numerical simulation. <http://www.salomeplatform.org/>.
  - [17] NURISP overview. <http://www.nuresim.com/-www/nurisp/index.php?art=31>.
  - [18] NURESAFE\_D1\_11\_Project\_Presentation\_v1\_2. Turinsky, P.J. (2012) Advances in multi-physics and high performance computing in support of nuclear reactor power system modeling and simulation. Nuclear Engineering and Technology, 44, 103.
  - [19] Weber, D.P., Sofu, T., Pfeiffer, P.A., Yang, W.S., et al. (2004) The numerical nuclear reactor for high fidelity inte-grated simulation of neutronic, thermal-hydraulic and thermo mechanical phenomena-



- project overview. The Physics of Fuel Cycles and Advanced Nuclear Systems: Global Development, Chicago, 25-29 April 2004, 13-20.
- [20] MIT Computational Reactor Physics Group. MIT benchmark for evaluation and validation of reactor simulations[C]. RELEASE Rev 1.0.1, July 7, 2013.
- [21] ZHANG Hongbin. Review of experiments for CASL neutronics validation[C]. CASL-U-2012-0039-000, INL, March 29, 2012.
- [22] CASL-U-2012-0131-004. VERA core physics benchmark progression problem specifications[C]. Revision 4, August 29, 2014.
- [23] PERNICE Michael. Survey of software quality assurance and code verification practices in CASL[C]. CASL-U-2013-0079-000, ORNL, March 26, 2013. <http://www.casl.gov/docs/CASL-U-2013-0079-000.pdf>.
- [24] CASL-U-2014-0006-000. Milestone L2:VRI. P6. 04, Virtual environment for reactor applications (VERA):Snapshot 3. 0[C]. July 24, 2013.
- [25] CASL-U-2013-0164-000. Milestone L2:VRI. P7. 01, Virtual environment for reactor applications (VERA):Snapshot 3. 1[C]. July 24, 2013.
- [26] CASL-U-2014-0083-000. Technical note RNSD-00-000:Evaluating the Denovo SPN discretization[C]. Rev 1, ORNL, April 5, 2013. <http://www.casl.gov/docs/CASL-U-2014-0083-000.pdf>.
- [27] CASL-U-2014-0036-000. Industry test stand experience, Westinghouse electric company LLC, Advanced modeling applications[C]. March 28, 2014. <http://www.casl.gov/docs/CASL-U-2014-0036-000.pdf>.
- [28] CASL-U-2014-0042-001. Validation and uncertainty quantification (VUQ), strategy[C]. Revision 1, March 31, 2014.
- [29] CASL-U-2014-0045-000. MPACT testing and benchmarking results[C]. ORNL, March 31, 2014.
- [30] CASL-U-2014-0099-000. Overview of the consortium for the advanced simulation of light water reactors[C]. ORNL, April 17, 2014.
- [31] CASL-U-2014-0185-000. VERA-CS validation plan[C]. ORNL, October 21, 2014. <http://www.casl.gov/docs/CASL-U-2014-0185-000.pdf>.
- [32] PALMTAG S, et al. Coupled neutronics and thermal-hydraulic solution of a full-core PWR using VERA-CS[C]. PHYSOR 2014, Kyoto, Japan, Sep 28-Oct 3, 2014.
- [33] KOCHUNAS B, et al. VERA core simulator methodology for PWR cycle depletion[C]. ANS MC2015, Nashville, Tennessee, April 19-23, 2015.
- [34] CLARNO K T. High fidelity modeling of pellet-clad interaction using the CASL virtual environment for reactor applications[C]. ANS M&C2015, Nashville, Tennessee, April 19-23, 2015.
- [35] CASL Tech notes[R/OL].<http://www.casl.gov/docs/CASL-U-2013-0186-000.pdf>.
- [36] [EB/OL]. <http://www.nuresafe.eu>.
- [37] MO Zeyao, ZHANG Aiqing, CAO Xiaolin, et al. JASMIN: A parallel software infrastructure for scientific computing[J]. Front Compute Sci, 2010, 4(4): 480-488.
- [38] KAZIMI M, MASSOUD M. A condensed review of nuclear reactor thermal-hydraulic computer codes for two-phase flow analysis[R]. Energy Laboratory Report No. MIT-EL 79-018, 1980.

- [39] KELLYD J, AVILES B N, RPMANO P K. Analysis of select BEAVEERS PWR benchmark cycle 1 results using MC21 and OpenMC[C]. PHYSOR 2014, The Westin Miyako, Kyoto, Japan, September 28-October 3, 2014.
- [40] KANG S, SHIM H J. Monte Carlo T/H feedback with on-the-fly Doppler broadening for the VERA 3D HFP assembly benchmark problem[C]. Reactor Physics Asia 2015, Jeju-si, Korea, September 16-18, 2015.
- [41] GILL D F, GRIESHEIMER D P, AUMILLER D L. Numerical methods in coupled Monte Carlo and thermal-hydraulic calculations[C]. ANS M&C2015, Nashville, Tennessee, April 19-23, 2015.
- [42] DAEUBLER M, IVANOV A, et al. High-fidelity coupled Monte Carlo neutron transport and thermal-hydraulic simulations using serpent2/SUBCHANFLOW[J]. Annals of Nuclear Energy, 2015, 83: 352-375.
- [43] NURES SAFE Project [EB/OL]. <http://www.nuresafe.eu/>.
- [44] ZHANG Baoyin, LI Gang, DENG Li, et al. JCOGIN: A parallel programming infrastructure for Monte Carlo particle transport[C]. PHYSOR2014, The Role of Reactor Physics Toward a Sustainable Future The Westin Miyako, Kyoto, Japan, September 28-October 3, 2014.
- [45] DENG Li, YE Tao, LI Gang, et al. 3-D Monte Carlo neutron-photon transport code JMCT and its algorithms[C]. PHYSOR 2014, Kyoto, Japan, September 28-October 3, 2014.
- [46] CHENG Tangpei, et al. Development of parallel 3D discrete ordinates transport program on JASMIN framework[C]. 7ICMSNSE, Ottawa, Ontario, Canada, October 18-21, 2015.
- [47] GASTOND R, PERMANN C J, PETERSON C J, et al. Physics-based multiscale coupling for full core nuclear reactor simulation[J]. Annals of Nuclear Energy, 2015, 84: 45-54.
- [48] PALMTAG S, et al. Coupled neutronics and thermal-hydraulic solution of a full-core PWR using VERA-CS[C]. PHYSOR 2014, Kyoto, Japan, Sep 28-Oct 3, 2014.

## 作者简介



杨文，日本京都大学博士，中国原子能科学研究院研究员，博士生导师。国际核聚变材料学会（ICFRM）顾问委员会委员、中国材料学会理事、中国核学会材料分会理事、中英“虚拟核反应堆”国际合作项目中方技术负责人，长期从事反应堆材料研发工作，取得多项开拓性的理论与应用成果。发表 SCI 学术论文 60 余篇，专利、软件注册 20 余项。

## 信息化助力国家自然科学基金， 实现精准管理与开放共享

李 东<sup>1</sup> 马 建<sup>2</sup> 姚 畅<sup>1</sup> 陈 文<sup>3</sup> 张兆田<sup>1</sup>

(1. 国家自然科学基金委员会；2. 香港城市大学深圳研究院；  
3. 爱瑞思软件（深圳）有限公司)

### 摘 要

信息化浪潮在改变社会生活的同时，也在改变人类科研活动和科研管理范式，科研信息化已成为科学研究和科研管理工作的重要手段。国家自然科学基金委员会作为国家科研资助体系的重要组成部分，信息化工作经过多年建设，已经建成科学基金全过程管理体系和信息开放共享环境，有力地支撑着国家自然科学基金委员会各项业务的顺利开展，为国家自然科学基金委员会发挥其导向和协调作用提供了先进的技术和信息化支持。

### 关键词

科研信息化；精准管理；开放共享；国家自然科学基金

### Abstract

The information tidal wave is changing the social life and the human scientific research activities and scientific research management paradigm. e-Science has become a vital important means of scientific research and management. As an important part of national science research funding system, after many years of informatization construction, National Natural Science Foundation of China (NSFC) has built a whole process management system for research funds and an information opening and sharing environment, which effectively support various NSFC transactions, meanwhile provide advanced information techniques for NSFC to play a guiding and coordinating role in science research.

### Keywords

e-Science; Precise Management; Opening and Sharing; Science Fund

党的十九大报告指出：“创新是引领发展的第一动力，是建设现代化经济体系的战略支撑。要瞄准世界科技前沿，强化基础研究，实现前瞻性基础研究、引领性原创成果重大突破。”加快建设创新型国家，科技创新是全面创新中的引领者，是提高社会生产力和综合国力的战略支撑，必须摆在国家发展全局的核心位置。随着国家创新驱动发展战略的实施，我国科技研发投入快速增长，到2015年投入规模已居世界第2位。根据国家统计局数据<sup>[1]</sup>，全国研究与试验发展（R&D）经费支出从2002年的1 287.6亿元人民币增加到2016年的15 676.7亿元人民币，投入强度达到2.11%。这虽然与经济合作与发展组织（OECD）国家2.40%的平均水平还有距离，但已经超过欧盟15国2.08%的平均水平，而且投入强度一直呈稳定上升趋势，与发达国家的差距逐年缩小。为了使

R&D 投入落到实处、发挥效益，打造好科研信息化这一创新的“助推器”，积极探索与新形势相适应的科技创新模式迫在眉睫。

当今世界，以互联网、云计算、大数据、人工智能等信息技术为核心的新科技革命日新月异，在迅速改变社会生活的同时，极大地提升了科研生产力，催生科研活动和科研管理范式发生重大变革，科研信息化已经成为信息化领域最为活跃的组成部分。2006 年中央办公厅、国务院办公厅印发的《2006—2020 年国家信息化发展战略》提出，将加快教育科研信息化步伐列为推进社会信息化的战略重点之一。同年，国务院发布了《国家中长期科学和技术发展规划纲要（2006—2020 年）》，制定了到 2020 年我国科学和技术发展的总体目标和部署，明确提出了科研信息化的建设重点。

国家自然科学基金委员会作为国家科研资助体系的重要组成部分，发挥着促进信息化与科研活动、科研管理体系的融合，充分挖掘信息化对科研资助业务和科研资金管理的主动支撑作用，为发挥国家自然科学基金的导向作用提供更先进的技术手段。国家自然科学基金委员会的信息化自从 1992 年成立信息化工作领导小组以来，经过多年的建设，在科学基金管理、成果共享、门户网站、基础设施、办公自动化、系统运维、安全保障等方面均取得了显著成效，建成了科学基金全过程管理体系和信息共享环境，实现了国家自然科学基金委员会办公事务的数字化、网络化，为基金管理工作提供了一个项目管理、日常办公的信息环境；为广大科研工作者和评审专家提供了一个基金申请、项目评审的网络平台，有力地支撑着国家自然科学基金委员会各项业务的顺利开展，为国家自然科学基金委员会发挥其导向和协调作用提供了很好的技术和信息化手段。

## 1 国内外科研管理信息化发展现状

科研管理信息化的发展大致经历了计算机自动化、互联网信息化、智慧科研管理信息系统云服务的三个阶段。

计算机自动化（2000 年前）阶段，科研单位和科研人员利用计算机输入申请书和项目的编目信息，但同时还需要提交并保留申请书和项目合同等纸质文件。通过计算机收集的科研信息，可以帮助科研管理人员跟踪项目进展，但同时也要求科研人员打印大量的与项目相关的纸质文件。

互联网信息化（2000—2015 年）阶段，主要利用互联网与关系数据库技术实现了从申请书申报到项目结题的全过程信息化管理。基于互联网的科研管理信息系统让用户在任何时候上网就可以完成科研项目的日常管理工作，极大地提高了科研工作效率，基于数据库的决策支持系统，还可以帮助科研管理者提高科研决策水平。

例如，美国国家科学基金会（National Science Foundation, NSF）在 2000 年前就建成了基于互联网的科学基金项目申报系统（FastLane），之后经过不断升级改造，变成了今天的 Research.gov 系统。该系统支持科学基金项目申请的提交、状态查询、申请书评审、项目进展 / 结题管理以及项目财务管理等功能，可为科研单位和科研人员用户提供一站式科研管理服务。香港特区政府创新科技署在 1998 年开发并上线了互联网科技信息系统，实现了创新科技项目从应用到结题管理，以及精细化项目资金管理等功能，

确保了科技项目的风险管理。

在借鉴国内外先进科研管理信息系统开发经验的基础上，国家自然科学基金委员会于2000年初上线了科学基金网络信息系统，实现了基于互联网的科研管理信息化。利用计算机辅助决策支持系统，提高了科研管理与决策水平。

智慧科研管理信息系统（自2015年后）云服务阶段，随着开放获取和大数据时代人工智能的发展，云服务、平台策略、深度学习以及智能推荐算法等新技术也很快地应用到科研管理中来，催生出智慧科研管理信息系统云服务的新时代，精准化科研管理随之出现。

例如，英国提出 e-Science 计划，利用新一代互联网技术建立一种全新的科学研究模式，以促进大学科研人员与企业创新人员之间的科技合作和资源共享，提高科研与创新效率。欧洲的爱思维尔（Elsevier）公司最近提出了为科研人员画像功能，从科研人员的研究成果中提取其研究领域信息，以完成科技论文投稿和同行评议中评议人的选择与指派；美国的科睿唯安（Clarivate）公司利用 WoS 科技文献库数据分析研究趋势，发现研究热点，预测未来研究方向和科研人员的成就。

数据密集型科研新范式的发展，使科研成果管理成为科学研究与学术交流的重要部分。世界各国已经广泛推动公共资助产生科研成果的开放共享，多数国家科研资助机构已经出台开放获取政策，并将其作为推动全社会创新发展的重要基础。

2015年3月，美国国家科学基金会（National Science Foundation, NSF）发布了题为《今日的数据，明日的发现》的书面计划，要求在一年之内把同行评议期刊和评审会议记录接入到为公开访问而设立的兼容数据库中并提供下载，以加快公众获取科学出版物和数字化科学数据等基金支持的研究结果。欧盟拟在“Horizon 2020”计划中全面实施开放获取，要求所有受资助项目产生的研究论文必须在规定的时间内存储到开放获取知识库中，旨在到2020年实现一个单一的、开放的欧洲网上科研空间，研究人员可以在该空间利用先进的、无处不在和可靠的网络和计算服务，并实现对 e-Science 环境和全球数据资源的无缝和开放访问。澳大利亚政府从2008年启动建设国家科学数据服务网络（Australian National Data Service, ANDS），旨在全面整合全国数据资源，实现数据长期保存和共享利用。英国研究理事会2013年再次修订并发布了开放获取政策指南，要求受资助的开放出版论文以 CC\_BY 协议发布，以提高研究成果的利用效率。成立于2012年的全球研究理事会（Global Research Council, GRC），旨在提出国际科技界能够共同接受的科学发展方案，推动更多的国际科技合作，促进高质量科研数据、方法和技术的共享。2013年，GRC会议通过了《科技论文开放获取行动计划》，鼓励和呼吁公共资助的科研成果实行开放获取，同时还提出了一系列措施推动和支持研究成果在开放出版期刊上发表和在开放获取知识库中展示。

我国也正在积极适应新的信息化发展趋势，加快推进科研信息化工作，为提升国家科技创新能力提供强大助力。2015年10月，科学技术部信息中心建设的国家科技管理信息系统公共服务平台开通试运行。该平台承载各类面向专业机构、评估机构、评审专家、科研人员、社会公众的管理服务模块，主要包括项目管理、信息公开公示、项目申报以及有关资源服务模块，通过与各部门、各地区有关科技管理信息系统、数据资源街



接,保障管理改革、服务科技创新,推进科技计划在统筹决策、组织实施、评估评价、成果转化等环节的科学规范管理。另外,科技部牵头建设了国家基础条件平台,运用现代信息技术等手段整合科技资源,推动科技资源开发共享。中国科学院建设了全院科研人员可公开共享、无缝使用的“科技云”“管理云”“教育云”环境,有力地支撑了科技创新活动。

## 2 国家自然科学基金管理信息化的历史进程

自1992年成立信息化工作领导小组以来,经过20多年的建设,国家自然科学基金委员会的信息化工作取得了显著成效,逐步实现了基于互联网的项目申请与受理、同行评审与会评、项目立项管理、进展和结题管理、项目资金管理、专家维护等各个环节的管理服务,通过先进的信息技术手段实现了自然科学基金的精准管理,为广大专家和项目依托单位提供了更好的信息服务,为国家自然科学基金委员会发挥其导向和协调作用提供了很好的技术和信息化手段。

学习发达国家科研管理信息化的经验和顺应科研管理信息化的时代要求,国家自然科学基金委员会于1997年年底开始建设科学基金项目管理系统(MIS),1998年3月初步投入使用,该系统是面向国家自然科学基金委员会内部工作人员开展项目管理业务的信息处理系统。

国家自然科学基金委员会自2000年开始了基于互联网的科研信息化发展过程。2000年初上线科学基金网络信息系统(Internet-based Science Information System, ISIS),首次实现了基于互联网的科学基金项目申报、评审、进展与结题管理等一站式科技管理服务,极大地提高了科学基金管理工作效率。2003年由于SARS原因,提前实现了全委的网上申请项目无纸化指派和评审,在国家自然科学基金委员会科研信息化的进程中具有里程碑式意义。自2007年起,科学基金网络信息系统新增了项目成果的收集与开放存取功能,项目负责人在科学基金网络信息系统填写进展/结题报告时,要求将项目成果通过DOI连接到原始文献数据库,以确保项目成果信息的真实性与规范化。自科学基金网络信息系统的建设开始,同行评议专家库就作为其功能的一部分同步开始了建设。同行评议专家库中的专家信息包含有专家基本信息、个人简介、研究领域、研究成果、承担项目情况等多方面信息,专家信息的维护和更新以及新专家的补充工作由各学科直接开展。为保证专家信息的准确性和有效性,每年科学基金项目评审工作开始前的1月到3月都要先开展专家信息维护、更新和补充工作,而且该项工作已经成为国家自然科学基金管理的一项主要工作进程。截至目前,同行评议专家库共有18万多名海内外专家,已经成为我国自然科学界的宝贵资源,也是科学基金项目管理不可或缺的一个重要支撑。基于可靠的科研项目、成果信息以及日益完善的专家信息,自2011年起,国家自然科学基金委员会开始了计算机辅助指派专家的研究,并将研究成果逐步在科学基金网络信息系统里实现。随着大数据与人工智能技术的不断发展,越来越多的申请项目专家指派工作可以通过计算机辅助完成,以确保项目评审能够更加公开、公平、公正和高效地进行。目前,科学基金网络信息系统服务超过3 000多家注册

的大学、科研单位和超过 100 万个科研人员用户,实现了从项目申请、项目评审、进展/结题管理和成果共享的科学基金项目全过程信息化管理。

为了推动科学基金项目成果共享和促进科技成果转化,国家自然科学基金委员会于 2006 年建设开通了国家自然科学基金资助项目信息共享服务网站,简称“科学基金共享服务网”(http://www.npd.nsf.gov.cn)。科学基金共享服务网开通之际公布了 2006 年前 10 年资助项目的基本信息和取得的学术研究结果,包括公开发表的论文、公开出版的著作和会议论文目录。2012 年进一步更新公布了 2008—2011 年结题项目的基本信息和相关成果信息。为进一步充分地共享资源,更好地为全社会提供服务,2013 年发布了新版“科学基金共享服务网”。新版网站在对之前公布的信息进行更新的同时,补充了公布的结题项目的结题摘要,完善了系统的各项功能。2014 年 7 月,根据《国家自然科学基金条例》和《国务院关于改进加强中央财政科研项目和资金管理的若干意见》(国发〔2014〕11 号)的相关规定和要求,国家自然科学基金委员会在“科学基金共享服务网”上陆续公布了科学基金资助项目成果和结题报告全文信息。2016 年,根据国务院办公厅印发的《国务院办公厅关于印发〈促进科技成果转化行动方案〉的通知》(国办发〔2016〕28 号)中关于建设国家科技成果信息系统的要求,国家自然科学基金委员会整合现有资源,避免重复建设,对科学基金共享服务网进一步完善系统功能、提升系统性能,增加了优秀成果展示、热词检索以及互联互通接口等功能,打造了一个全方位、一体化的国家自然科学基金委员会资助项目、结题项目和科研成果信息检索和服务系统平台,为社会公众、企业和科研人员提供了一个可以随时查询和浏览的自然科学研究成果信息门户,为国家科技成果转化提供了基础研究成果查询与数据服务。

2014 年 5 月,在北京召开的全球研究理事会北京会议上,国家自然科学基金委员会发布了《国家自然科学基金委员会关于受资助项目科研论文实行开放获取的政策声明》,声明要求得到公共资助的科研论文在发表后把论文最终审定稿存储到相应的知识库中,在发表后 12 个月内实行开放获取。该声明标志着中国开放获取政策的正式发布,这充分体现了国家自然科学基金委员会在推动开放获取、知识普惠社会、创新驱动发展方面的责任和努力,将极大地促进开放获取知识库的建设与发展,推动全社会的开放创新资源和能力,支持创新型国家建设,也表明了我国在全球科技信息开放获取中做出的重大贡献<sup>[2]</sup>。

2015 年 5 月 20 日,“国家自然科学基金基础研究知识库”(http://or.nsf.gov.cn/)正式建成并开通上线,与此同时,《国家自然科学基金委员会基础研究知识库开放获取政策实施细则》也同步发布,这标志着中国基础研究成果的开放获取知识库平台正式发布。

为深入贯彻落实《政府信息公开条例》,提高科学基金工作的透明度,充分发挥国家自然科学基金委员会信息对人民群众的服务作用,2008 年 11 月制定并发布了《国家自然科学基金委员会信息公开管理办法》,编制了《国家自然科学基金委员会信息公开指南》,按年度公布信息公开工作报告。

### 3 国家自然科学基金管理信息化建设成效

#### 3.1 国家自然科学基金精细化管理平台——科学基金网络信息系统

国家自然科学基金委员会自 2000 年上线科学基金网络信息系统以来, 针对项目管理各阶段呈现的问题, 提出了从“经验式”到“数字化”的科学基金项目管理方案<sup>[3]</sup>。数字化科研管理支持科学基金项目管理的整个生命周期, 包括如何从科学文献数据库中检索、收集和验证项目成果, 如何对资助项目和成果数据进行全方位分析, 以及如何利用人工智能与机器学习技术辅助基金项目管理等。同时, 国家自然科学基金委员会认真贯彻落实国务院印发的《关于加快推进“互联网+政务服务”工作的指导意见》(国发〔2016〕55号)的要求, 坚持统筹规划、问题导向、协同发展、开放创新的原则, 优化服务流程, 创新服务方式, 推进数据共享, 推行公开透明服务, 全力落实“放管服”改革举措, 让科学基金项目管理人员和科研人员共享“互联网+政务服务”发展成果。国家自然科学基金项目申请实现了所有项目类型的从纸质文件到在线填报的全面电子化转变, 项目申请的一站式服务等重要突破, 同时国家自然科学基金委员会正在积极推动电子签章在项目管理中的应用, 争取早日实现项目申请的无纸化。下面详细介绍包括项目申请管理、项目评审管理、项目执行管理和项目成果管理的国家自然科学基金委员会项目全过程信息化管理的主要特点。

##### 3.1.1 项目申请管理

由于科学基金项目申请数量多、申请学科代码下关键词不规范等原因, 项目申请给资助机构内部人员、依托单位管理人员和项目申请人都带来了不同形式的困难。数量庞大的申请书的形式审查工作变得越来越繁重, 而传统的基金项目管理系统基本上是一个信息孤岛, 与外部信息源的融合具有异构性、成本高等问题, 从而导致申请人简历/项目申请内容的真实性审查等变得十分困难。为了规范科研项目管理, 规范并高效收集科研成果数据是自然科学基金管理的当务之急。国家自然科学基金项目申请实现了从纸质文件到全面电子化的转变, 在一站式项目申请服务、学科领域本体库构建、分布式并行处理机制等方面均取得了重要突破, 实现了在同一截止日期接收 19 万份申请书的任务。

首先, 通过一站式项目申请服务规范申请人/参与人科研简历。不同的政府资助机构在项目申请书中对项目申请人和主要参与人的科研背景都有一定的要求, 设计简单易用的科研简历将大大提高项目申请效率。对于科研人员来说, 可以根据自己的科研成果生成符合资助机构要求的科研简历, 从而提高科研工作效率。而对资助机构来说, 在检查申请书成果信息时, 可以直接链接到科技文献数据库, 从而保证申请人所填写的科研成果数据的真实性与规范化。

其次, 通过构建学科领域本体库来规范申请书关键词填写<sup>[4]</sup>。项目申请人填报项目关键词和评议人选择研究领域时, 时常出现同一个概念用不同的关键词来表达。为此, 需要构建学科领域本体库, 对科研管理中使用的关键词进行规范化。项目关键词规范化采用词频分析和社会化投票的方式进行, 一方面利用词频统计分析挖掘学科领域下的关



关键词,另一方面邀请项目负责人对熟悉的学科进行关键词投票,结合二者规范项目关键词库。学科领域本体库是项目申请与评议人指派的基础。建立了规范关键词库,可以在申请人填报申请书和评议人更新个人简历时进行相关关键词推荐,从而提高申请书与评议人之间的匹配度以及项目评审的质量。

最后,随着国家自然科学基金申请数量的快速增长,如何保持项目申请期间的系统效率变得越来越重要。科学基金网络信息系统设置分布式并行处理机制,使得在项目申请期间,尤其是申请书提交的最后阶段保持良好的稳定性和高效率,保证项目申请安全、高效地进行。

### 3.1.2 项目评审管理

科学基金项目评审需要为每一份申请书选取若干名同行专家进行项目通讯评审。如何有效地利用计算机辅助指派评议人,避免利益冲突,提高评审质量,是我们一直研究的问题。国家自然科学基金委员会在项目评审阶段进行了不断改良,利用信息化手段保证项目评审的公开、公平、公正。主要措施包括通过相似性检查防止项目重复申报、利用科研大数据对评审专家进行全面准确画像、使用计算机辅助指派系统对申请书智能分组和评议人推荐等<sup>[5]</sup>。

科学基金项目的评审原则是“依靠专家、发扬民主、择优支持、公正合理”,同行评议是保证“择优”“民主”“公正”的关键环节。一个申请项目在评议过程中能否被公平遴选,取决于能否为该项目合适地选择通讯评议专家,而计算机辅助智能指派系统则为选择合适专家提供辅助决策支持。智能指派系统充分利用了申请书信息(如项目类别、资助申请代码、项目关键词等),申请人信息(如个人基本信息、研究背景等),以及评议人信息(如个人基本信息、申请代码/领域/关键词、研究背景等),依据大数据科研分析框架,提取科研质量、相关度和合作度等多维度的科研特征,排除相关度不符合和与申请书质量相差较远的评议人,以相似度进行辅助指派<sup>[6]</sup>。

为了提高科学基金管理效率,国家自然科学基金委员会在计算机辅助指派系统上做了大量工作。首先,国家自然科学基金委员会各学科建立了规范的应用代码-研究方向-关键词体系,规范了申请书的研究领域信息;其次,通过多年的积累和完善,建成了信息比较完整,覆盖比较全面的国家自然科学基金委员会专家库,为计算机辅助指派奠定了良好的工作基础;最后,系统为项目申请书与符合资格的评议人画像并建立科研社交知识图谱,在大数据科研分析框架理论的支持下,从科研质量、合作度和相关度三个维度出发,结合文本挖掘、网络分析等技术,设计智能匹配算法。在考虑利益规避、评议工作量限制等基础上,系统使用评议人指派优化策略,快速为每个申请书生成评议人候选集合,以辅助学科主任的指派工作。

### 3.1.3 项目执行管理

由于自然科学基金项目种类多,研究主题广泛,方向分散,需要一种可操作性强、规范化的统一管理。国家自然科学基金委员会经过多年努力,通过信息化手段加强资助项目的年度进展报告和结题报告管理,如对基金资助项目的成果标注进行检查等。

数字化科学基金项目管理方案重视基金项目的全过程管理,包括项目年度进展报告

和结题报告以及项目资金的规范化管理。项目年度进展报告规范化将项目阶段性成果进行搜集和汇总,减少手工录入的错误,并设置项目任务提醒,保证项目负责人在项目截止日期前完成任务和提供准确可靠数据。结合大数据科研分析框架,定量分析科研投入产出情况,为项目结题验收提供决策依据。

利用成果在线对科研项目成果进行自动收集和标准化处理,可以避免或减少项目负责人在提交年度进展报告和结题报告中成果格式不规范、信息不完整以及项目标注不准确等情况发生,促进科研项目管理的科研诚信。

### 3.1.4 项目成果管理

在项目成果管理过程中,管理人员可以通过计算机统计分析本学科/本资助计划/本单位的项目资助与成果产出情况,进行项目的绩效评估和决定项目是否连续资助。国家自然科学基金委员会利用信息化手段在统计分析、对比分析等方面进行了不断改进,并取得了显著效果。

在项目成果统计分析方面,把科研成果数据以数字化、图表化等可视化方式展现,为基金发展规划提供了有效的决策支持和分析工具。主要包括科研竞争力分析、科研领域汇总分析及科研合作与共享分析等内容。科研竞争力分析指利用科研分析框架,根据已有的科研成果数据,对地区、高校、科研院所及个人的科研竞争力(数量、质量和影响力)所作的分析报告。科研领域汇总指利用科研分析框架,根据已有的科研成果数据,进行研究领域汇总、分析,提供科研领域汇总分析报告。科研合作分析指利用科研分析框架,根据已有的科研成果数据,对某地区、高校、科研院所及个人与其他地区、高校、科研院所及个人的合作情况进行汇总、分析,提供科研合作与共享分析报告。

在项目成果对比分析方面,为了进一步加强自然科学基金的战略规划,对不同层次的目标进行对比分析,可以利用科研分析框架,对所选择的学科/资助计划/单位/地区进行科研成果数据对比分析,实施标杆管理。一方面有助于明确发展战略定位,制定发展目标,从而使各单位都能在良性竞争的环境里快速发展;另一方面,可以调整自然科学基金的资助方向和资助重点。

数字化科研管理也极大地促进了开放获取和知识共享的发展,规范化采集到科学基金网络信息系统的科研成果每年将定期增量发布到科学基金共享服务网和基础研究知识库,提供知识共享和开放获取服务。

## 3.2 国家自然科学基金共享服务与开放获取平台

通过信息共享,向研究人员提供科研成果信息及科学知识检索服务,向社会公众推广和普及科学知识,满足不同社会群体对基础研究信息资源的共享需求,对大幅提升我国科技创新能力,加快建设创新型国家具有至关重要的作用。

科学基金共享服务网利用已积累的自然科学基金基础研究的成果信息,结合国家自然科学基金委员会相关政策、管理制度等相关信息,为科研人员提供一整套有利于信息获取及合作交流的科学研究共享服务体系,力图打造一个全方位、一体化的科学研究信息共享和服务系统平台<sup>[7]</sup>。一方面,为社会公众用户提供一个可以随时查询和浏览自然科学



研究信息的门户,同时也为科研人员了解和掌握领域同行的研究动态及研究成果提供智能信息检索工具;另一方面,对于管理部门来说,可提供全面的基础研究成果的统计分析数据,充分展示科研成果对于社会发展和科学研究的重大作用和价值,对解决项目重复研究、多头重复申报等问题提供有效支撑。截至目前,已公布1986—2016年资助项目的相关信息,已公开2003—2016年结题项目的相关信息和成果信息,其中,结题项目201382个,项目成果3040978个。同时,进一步多角度地推进科学基金共享服务网与国家科技报告服务系统之间信息的共享和链接,将目前在科学基金共享服务网公开的结题项目信息及相关成果信息提交到国家科技报告服务系统予以公开。

科学基金共享服务网目前提供有资助项目检索、结题项目检索和成果检索三大类检索服务。对结题项目提供“按申请领域”检索、“按项目类型”检索、“按成果类型”检索三种检索方式,提供“按申请领域”“按项目类型”“按成果类型”“按结题年份”“按地理信息”五种统计方式。申请领域涵盖了国家自然科学基金委员会8个科学部,项目类型包括面上项目、青年项目、地区项目、重点项目、重大项目、国家杰出青年基金、创新研究群体项目、港澳青年学者合作研究基金项目等,成果类型包括期刊论文、会议论文、著作、奖励、专利五个方面。

国家自然科学基金基础研究知识库作为我国学术研究的基础设施,收集并保存国家自然科学基金资助项目成果的研究论文的元数据与全文,目前已回溯并发布资助项目成果的研究论文全文518524篇,包含781193个作者、1792个机构,涉及2000—2017年、27300多种期刊和19600多个会议。后续会在每年的11月增量发布上一年度国家自然科学基金结题项目成果的研究论文的元数据与全文。基础研究知识库开通至今全文下载次数已达340万多次,基础研究知识库的开放获取,必将推动中国开放获取的实际应用,推动公共投资所产生的知识迅速转化为全社会的创新发展能力,让知识普惠社会,创新驱动发展。

## 4 国家自然科学基金委员会未来科研管理信息化的思考与展望

习近平总书记在中央网络安全和信息化领导小组第一次会议上强调指出,没有信息化就没有现代化,展示了党和国家推动信息化发展的坚定决心。没有科研信息化就没有科研现代化,科研信息化是国家“创新驱动发展战略”的必由之路和重要抓手。作为国家自然科学基金委员会科研管理信息化最宝贵的核心资产,多年来科学基金网络信息系统运行积累的科研大数据所产生的红利仍被低估。国家自然科学基金委员会科研大数据包括研究人员、研究过程、资助管理、研究环境和研究成果等科研全过程数据,是国家自然科学基金委员会来之不易的战略资源,是建立所有业务系统的数据基础。目前,国家自然科学基金委员会科研大数据利用已经不再是简单的数据仓库,而是要通过对数据的深度加工和挖掘,提炼出供基金管理人员决策分析、供资助人员按需所得的知识服务,并通过业务终端的持续学习,最终将知识服务转化为智慧服务,充分释放国家自然科学基金委员会数据红利,充分发挥国家自然科学基金委员会全过程科研管理的战略优势。结合国家自然科学基金委员会科研信息化的现状和大数据时代的新要求,对未来科

研管理信息化有以下几点思考。

首先，国家自然科学基金委员会是我国参与国际组织倡导科技资源开放存取最早的政府资助机构之一，科研信息与资源共享可以极大地促进我国的科技创新事业发展。大数据时代需要安全的科研资源共享机制，来支撑未来科研管理信息化建设。未来的科研资源共享机制可以考虑采用协同创新的共享模式，鼓励各资助机构和科研单位开放公共 API 接口和使用云服务，利用区块链技术等保证信息传输和资源共享的安全，实现科研信息的云存储和按需共享。作为国家科研资助体系的重要组成部分，国家自然科学基金委员会将主动开展政务信息系统的整合，按计划接入国家统一数据共享交换平台，实现基于网络的科研资助、管理信息以及科研数据资源的共享，从而实现跨部门的业务协同办理。

其次，未来科研管理信息化需满足产学研一体化需要，为我国的科研、创新与创业发展服务。科研管理信息化的最终目标是服务于科研社群和整个社会的创新，支持可持续经济发展。科研管理信息化就是要解决大学科研与企业创新需求的信息不对称、科技成果转化率低，以及产学研合作难等问题。因此，未来的科研管理信息化需要打通大学、科研院所与企业以及人员之间的信息壁垒，实现科研与创新过程中供需关系的无缝对接，形成产学研一体化的协同创新生态环境。

最后，科研管理信息化人才培养是实现专业、高效科研管理最关键的因素。大数据时代尤其需要科研管理信息化的领军人才，人才的培养需要注意几个方面：①注重科研管理理论和实践的综合素质培养，科研管理信息化人才是高素质管理型人才，能够担负起各大学、科研单位和资助机构等的重要职责；②各资助机构、大学和科研单位应该根据所在地区和不同科研领域的特点，设计适合自己特点的科研管理信息化方案；③加强大数据和人工智能等高科技信息化人才的培养，科研管理信息化需要走在时代前沿的最新信息技术，需要利用互联网+，如社交网络、移动应用、大数据/人工智能、云计算（Social, Mobile, Analytics and Cloud Technologies, SMAC）等前沿技术来解决科研管理中的问题。

展望未来，国家自然科学基金委员会将从科研人员和科研管理用户出发，设计和提供更加智能的个性化科研管理服务。在未来的信息化道路上，我们会一如既往地结合科研管理实际需求，不断进行信息化的迭代。

国家自然科学基金委员会“十三五”信息化建设将以国家信息化发展战略为依据<sup>[8]</sup>，以国家自然科学基金委员会“十三五”战略规划为导向，以互联网+科技管理为推动，以《国家自然科学基金条例》为规范，遵循“统筹规划、推进共享、拓展应用、提升功能、规范高效、安全可靠”原则，在现有信息化建设成果的基础上进一步推进信息系统从数据服务向知识服务、从服务用户向服务社会迈进，建设以人为根本、以服务为核心、以智能为特点的信息环境。国家自然科学基金委员会将全面深化信息系统对科学基金管理的主动支撑作用，打造一个透明开放、高效集约、功能丰富、交互畅通、安全可靠、持续发展的信息服务环境，促进我国科学基金事业快速、平稳地向前发展。

## 参考文献

- [1] 全国科技经费投入统计公报 . <http://www.stats.gov.cn/tjsj/tjgb/rdpcgb/qgkjffrtjgb/>.
- [2] Jianjun Li, Mingshe Zhang, Dong Li, Wei Zhang, Jin Wang. Construction Scheme of NSFC Open Access Library[J]. International Journal of Security and Its Applications, 2015, 9(8): 243-252.
- [3] 马建, 刘卫, 许伟, 等. 智慧科研: 让管理更科学——精细化自然科学基金项目管理新思维 [J]. 中国科学基金, 2011(6): 331-334, 347.
- [4] Jiang Hongbing, Yang Chen, Ma Jian, Silva Thushari, Chen Huaping. A Social Voting Approach for Scientific Domain Vocabularies Construction[J]. Scientometrics, 2016, 108(2): 803-820.
- [5] Ma Jian, Xu Wei, Sun Yong-hong, Turban Efraim, Wang Shouyang, Liu Ou. An Ontology-Based Text-Mining Method to Cluster Proposals for Research Project Selection[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part A: Systems and Humans, 2012, 42(3):784-790.
- [6] Silva T, Guo Z, Ma J, Jiang H. Chen H. A social network-empowered research analytics framework for project selection[J]. Decision Support Systems, 2013, 55(4): 957-968.
- [7] 王岩, 李建军, 王东鹏. 科学基金共享服务网的建设及思路 [J]. 中国科学基金, 2014, 28(3): 190-194.
- [8] 李建军, 卿来云. 国家自然科学基金委员会“十三五”期间信息化建设展望 [J]. 中国科学基金, 2017, 31(2): 170-175.

## 作者简介



李东, 高级工程师, 国家自然科学基金委员会信息中心副主任。计算数学及计算机软件专业, 长期从事科学基金项目、信息系统管理的相关研究与建设工作。2001 年开始建设国家自然科学基金网络信息管理系统, 目前负责科学基金信息管理与开放共享管理。

## “国家哲学社会科学文献中心”建设与展望

王 岚

(中国社会科学院图书馆)

### 摘 要

本文回顾了中国社会科学院近年来信息化实践探索,分析了哲学社会科学信息化面临的挑战,提出了全面加快建设国家哲学社会科学文献中心的策略。

### 关键词

哲学社会科学信息化;国家哲学社会科学文献中心;中国社会科学院

### Abstract

Review the practice of CASS (Chinese Academy of Social Sciences) in e-Science, analyze the challenges in e-Social Science, put forward the strategies to speed up the construction of NCPSSD (National Center for Philosophy and Social Sciences Documentaion).

### Keywords

e-Scocial Sciences; NCPSSD (National Center for Philosophy and Social Sciences Documentaion); CASS(Chinese Academy of Social Sciences)

近年来信息技术飞速发展,特别是互联网、大数据、人工智能相关技术的广泛应用,正在重塑人类社会。以人类社会为研究对象的哲学社会科学的研究方式、方法也逐步发生转变,对哲学社会科学信息化提出了新要求。中国社会科学院积极响应国家加快构建中国特色哲学社会科学、建设中国特色新型智库的新目标,对哲学社会科学信息化进行探索和思考。

## 1 中国社会科学院信息化建设实践探索

### 1.1 完善机制体制,加强顶层设计

2013年起,中国社会科学院开始实行信息化机制体制改革,以整合全院信息化资源,集中力量建设数字化社科院。随着改革的不断推进,明确了相关机构的职责,使中国社会科学院图书馆成为信息化建设的主要责任单位;明确了全院信息化建设的主要原则,管建分离,统合资源,不搞重复建设;明确了全院信息化建设的主要内容为“一库、一网、一平台”,“一库”为哲学社会科学海量数据库,“一网”为中国社会科学网及支撑全院信息化建设的网络基础设施,“一平台”为综合集成实验室和综合管理平台。

## 1.2 “一库一网一平台”逐步推进

中国社会科学院哲学社会科学海量数据库初见成效。海量数据库建设工程（一期）项目于2015年4月正式开始建设，科研成果数据库、馆藏文献数据库、社会调查数据库、古籍数据库等子库基本建成，将于2017年年底上线服务。国家哲学社会科学学术期刊数据库成为国内最大的哲学社会科学开放获取平台，并荣获国家新闻出版广电总局“全国报刊媒体融合创新案例20佳”。

中国社会科学网不断改版升级，坚持学术本位，遵循频道化和专题化的建网路径，设置资讯、学科、综合和互动四大版块，开设54个频道、1300余个栏目，开办论坛、博客、微博，开通移动客户端，打造多媒体学术传播平台，加强学术网络传播建设，成为国内外有影响力的哲学社会科学学术门户。

网络基础设施不断优化，为科研人员提供良好的用网服务。全院21个学科片以院本部为中心，通过SDH专线以1G带宽BGP自治域方式统一接入互联网，实现主干链路负载均衡、千兆至桌面。建成实名上网、电子邮件系统等基础应用系统，建成全院统一、自主管理机房系统。中国社会科学院云平台（一期）已建成运行，为海量数据库建设提供了坚实的软硬件支撑。

综合集成实验室和综合管理平台在前期论证完成的基础上，启动建设调研，并持续资助特色实验室利用新技术开展研究。中国舆情调查实验室以舆情监测和网络舆情调查为基础，致力于构建中国舆情指数体系，为社会各界提供社会舆情“晴雨表”以及舆情与传播的综合解决方案。城市信息集成与动态模拟实验室充分利用现代信息技术，对城市复杂系统的大量信息进行采集、整理和分析，运用数据库、地理信息系统、移动互联网和大数据分析等新兴技术，对城市经济、社会与空间信息进行有机整合，将统计数据与空间数据结合起来，对城市系统运行进行定量模拟与监测，为城市的科学决策与管理，以及为实现城市的科学发展提供有力的技术支撑。

## 1.3 建设国家哲学社会科学文献中心

为贯彻落实习近平总书记在哲学社会科学工作座谈会上的重要讲话精神，2016年9月，中国社会科学院牵头建设“国家哲学社会科学文献中心”。依托中国社会科学院信息化“一库一网一平台”的建设经验和建设成果，2016年12月30日，国家哲学社会科学文献中心正式上线。

国家哲学社会科学文献中心门户网站设置资源、资讯、专题、服务4大主要栏目，整合了中文优秀学术期刊1000余种，外文开放获取期刊8000余种，上线数据达1100余万条，实现了文献信息一站式检索、浏览、免费下载等功能，面向社会提供公益性学术信息服务。

上线以来，国家哲学社会科学文献中心取得了良好的社会效益。截至2017年9月30日，个人注册用户超过35万人，机构用户近300家，总点击量超过7500万次，资源检索次数超过800万次，全文下载总量超过900万篇。在2017年5月17日庆祝中国社会科学院建院40周年活动中，刘延东副总理视察了国家哲学社会科学文献中心，并给予了高度评价。



## 2 哲学社会科学信息化面临的新挑战

### 2.1 新技术、新理念催生研究方式方法转变

随着信息技术的发展,哲学社会科学研究所依赖的信息的形态已不仅仅是传统的文献资料,而是包括了文本、图像、音频、视频及各类数据,并且这些信息来源各异、增长迅速,成为“大数据”。科研资料总量的快速增加、形态的多样化,给哲学社会科学学者带来了巨大挑战,已经远远超越了传统人工查找、搜集、阅读能力所能处理的范畴,必须借助计算机系统平台进行处理。

特别是随着人工智能技术的发展,自然语言处理技术不断成熟,哲学社会科学领域引入了大量的计算机处理模式和分析方法,各类依托数字化学术资源,基于复杂运算和分析的计算机模拟与实证,基于事实与证据的商业预测与案件证据推理等研究议题广泛兴起,从根本上改变了知识的获取、标注、比较、取样、阐释与表现方式。以文本挖掘、复杂网络分析、大规模数据分析为特征的研究方法逐渐被采纳,形成了计算社会学、数字人文等新的研究形态。

2009年,戴维·雷泽尔(David Lazer)等在《科学》发文提出“计算社会科学”的构想。2014年,美国社会学界举办“新计算社会学”学术研讨会。瑞·M·张(Ray M. Chang)探讨了大数据带来的社会科学范式的转换,认为大数据带来了更便捷的数据收集技术,社会科学与计算科学、信息科学相结合,正在向“计算社会科学”和“网络社会科学”的方向转变。在语言学、文学、历史学、文艺学、民族学等多个人文领域,数字人文取得了引人注目的效果,形成了国际数字人文机构联盟和数字人文中心网络两大数字人文研究联盟。

哲学社会科学的创新发展日益依赖于大规模数据平台、大规模研究分析平台的支持,通过平台进行数据建模、描述、组织、保存、访问、分析和复用,实现海量数据的可知识对象化、可计算化。

### 2.2 国家加快构建中国特色哲学社会科学,加强中国特色新型智库建设

顺应新时代国家发展的需要,国家提出了加快构建中国特色哲学社会科学和加强中国特色新型智库建设的新目标。

2015年1月20日,中共中央办公厅、国务院办公厅印发《关于加强中国特色新型智库建设的意见》(以下简称《意见》)。中共中央提出要从推动科学决策、民主决策,推进国家治理体系和治理能力现代化、增强国家软实力的战略高度,把中国特色新型智库建设作为一项重大而紧迫的任务切实抓好。《意见》明确指出新型智库要具备多层次的学术交流平台 and 成果转化渠道,具备功能完备的信息采集分析系统。

2016年5月17日,习近平总书记在哲学社会科学工作座谈会上发表重要讲话,深刻回答了事关我国哲学社会科学长远发展的一系列根本性问题,是指导哲学社会科学工作的纲领性文献。讲话明确提出,构建中国特色哲学社会科学是一个系统工程,是一

项极其繁重的任务,要加强顶层设计,统筹各方面力量协同推进。要加强哲学社会科学图书文献、网络、数据库等基础设施和信息化建设,加快国家哲学社会科学文献中心建设,构建方便快捷、资源共享的哲学社会科学研究信息化平台。这是新时期为实现加快构建中国特色哲学社会科学的目标,国家对加强我国哲学社会科学文献信息资源保障和加强信息技术在哲学社会科学研究中的运用提出的新要求。

2017年5月16日,中共中央进一步印发了《关于加快构建中国特色哲学社会科学的意见》,对如何加快构建中国特色哲学社会科学提出了新要求。

2017年10月18日,中国共产党第十九次全国代表大会胜利召开。习近平总书记在报告中明确提出,决胜全面建成小康社会,开启全面建设社会主义现代化国家新征程,要坚定文化自信,推动社会主义文化繁荣兴盛,要加快构建中国特色哲学社会科学,加强中国特色新型智库建设。

中国特色哲学社会科学、中国特色新型智库建设已经成为国家发展战略。加快构建中国特色哲学社会科学、加强中国特色新型智库建设,必须全面加快加强哲学社会科学信息化。

### 3 全面加快建设国家哲学社会科学文献中心

构建中国特色哲学社会科学、建设中国特色新型智库需要坚实的文献信息资源保障并加强信息技术的运用,而建设全面、合理、有效的哲学社会科学文献信息资源保障和信息化服务体系需要加强顶层设计,统筹各方面力量协同推进。习近平总书记提出的“国家哲学社会科学文献中心”为解决这一问题提供了新策略。

建设国家哲学社会科学文献中心可以推动我国哲学社会科学创新发展所必需的文献信息和科研数据的高效整合、统一发现、泛在获取、长期保存以及深度利用,促进我国哲学社会科学研究成果全生命周期的开放与融合,实现一体化传播。

目前,国家哲学社会科学文献中心的建设仅仅是刚刚起步。下一步,社科界应联合起来,共商、共建、共享,秉承人文思想与技术创新结合的理念,以公益、开放、协同、权威为定位,联合协作,完善机制,锐意创新,不断深入推进“国家哲学社会科学文献中心”建设。可以从以下几个方面着手:

(1) 借鉴国内外相关联盟和机构的成熟经验,探索建立高效的管理运行机制和制度,使“国家哲学社会科学文献中心”在哲学社会科学信息化领域真正发挥联合协作的作用。

(2) 倡导共建共享,建立统一标准,通过网络采集、数字化加工、商业化采购等各种方式,最大限度地整合哲学社会科学所需的各类型数据资源,形成种类齐全、质量可靠的开放型、公益性、具有学术权威的“数据池”,为哲学社会科学研究提供数据支持。

(3) 运用大数据、数据挖掘、人工智能等新技术,开发哲学社会科学研究所需的各种信息数据处理、分析工具,形成便捷易用的哲学社会科学研究信息化平台,为哲学社会科学研究提供技术支撑。

(4) 采用云计算和云服务理念,建设哲学社会科学信息化云平台,成为能够提供海量存储、异地灾备、大规模计算等功能的专业化社科IT基础设施,服务我国哲学

社会科学研究机构信息化建设，实现我国哲学社会科学领域 IT 基础设施管理和服务的模式创新。

### 作者简介

王岚，中国社会科学院图书馆党委书记、馆长，国家哲学社会科学文献中心负责人。



## 中国科技云安全保障技术现状与展望

龙 春 高 鹏 付豫豪 万 巍

(中国科学院计算机网络信息中心)

### 摘 要

中国科技云是承载中国科研信息化高速发展的重要基础设施,中国科技云安全保障是中国科学院“十三五”信息化专项安全工程体系建设的重要组成部分,其目标为构建云计算环境融合安全保障体系,为科研生产活动提供多维、高精度的网络信息安全保障。本文总体介绍了中国科技云安全保障技术现状以及支撑情况,并简要讨论了安全保障技术在云计算环境下的特点以及下一步发展方向。

### 关键词

云计算;中国科技云;安全保障技术

### Abstract

The science and technology cloud of China is an important infrastructure for the rapid development of scientific research with information technology, the insurance of this cloud is an important part of security project in CAS 13th Five-Year Program of Information, it aims at providing multi-dimensional and high-precision security insurance system for cloud computing environment with integration of variety security technologies. This paper presents an overview of security technologies in insurance of science and technology cloud of China. Its characteristics on security technology in cloud computing environment and the future development direction are briefly discussed.

### Keywords

Cloud Computing; Science and Technology Cloud; Security Technology

## 1 概述

云计算技术是下一代运算模式的演变,随着工程化实践的深入发展,给科研工作模式以及信息化建设带来了根本性变革。云计算环境下的安全保障,需要结合链路安全、应用安全、数据安全、主动防御等多层面、多种类安全技术进行一体化安全防护,针对虚拟化技术平台承载的各类应用系统,通过跨域链路加密、统一管控、令牌双因素等安全机制结合模式,实现用户数据交互、系统运营行为全周期安全保障,形成融合安全保障体系。

中国科技云基于专有云平台技术架构实现,比一般性计算环境更为复杂,安全防护保障需要深度融合适配,在接入环境、虚拟资源、用户环境等方面均需要不同级别、不同粒度的安全检测和防护,另外,非云环境下信息系统的迁移,也需要提供快速、安全、完整性的技术保障。本文从云计算支撑环境安全、云环境安全、深度保障三方面对

中国科技云安全防护体系的工程技术实践进行了整体性介绍。

## 2 安全体系架构

全面保障中国科技云网络空间环境安全，持续建设安全基础设施，不断提升安全服务支撑能力，实现网络安全基础资源的共享和优化配置。在“十二五”期间网络安全工作成果的基础上，通过构建融合安全保障模式，全面提升虚拟化云环境中网络入侵检测、流量清洗、访问控制、数据审计、用户保障等安全服务能力。以多租户隔离、虚拟融合、资源管理与监控等多元虚拟化安全技术为依托，保障多类型用户信息独立运行于隔离、安全环境中，减少针对单用户攻击影响整个系统的安全风险，实现中国科技云安全保障功能的统一全周期管控<sup>[1,2]</sup>。中国科技云安全保障体系示意如图1所示。

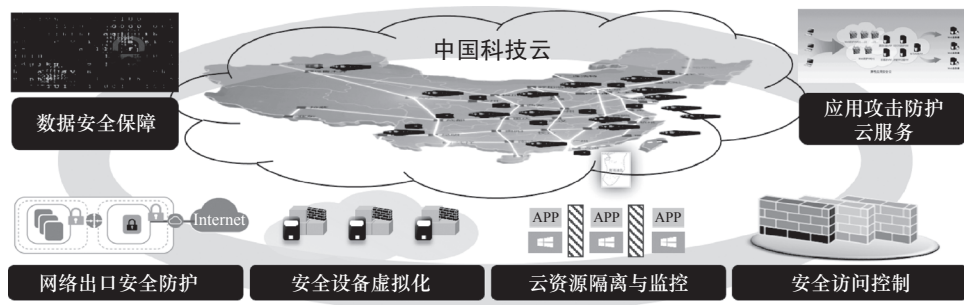


图1 中国科技云安全保障体系示意

面向中国科技云专有云计算环境，针对依托的网络空间支撑设施，构造全周期多维度安全防护环境，通过访问控制、攻击防御、流量检测、登录控制、主动评估、源码设计等系列安全控制措施的集成，提供云访问安全代理环境，保障网络空间中包括各类云环境在内的业务应用，满足中国科技云整体实际业务环境的安全防护需求。

在云内部安全防护建设方面，集中管控云平台横、纵向流量，实现可监控、可管理、可审计、可扩展，聚焦云平台整体的网络安全防护，以及用户和用户接入平台、云间互联的安全防护。在内部环境中，保障业务安全以及租户、用户接入安全，主机和虚拟机东西向访问安全。针对每个租户根据需求部署虚拟化软件安全防护措施。

在用户侧安全服务提供方面，为应用安全云服务、主动安全防御等系列安全服务提供统一接入环境，建设流量复制、分发、处理环境，为业务系统建设模块提供相关的管理和数据采集接口，输出数据为态势感知平台等分析、展示系统提供全方位数据支撑。

中国科技云计算安全保障体系的建设，在满足当前云计算环境及相关业务安全防护需求基础上，也具备一定的技术先进性和扩容延展能力，使安全防护措施能够按需扩充与升级换代。



3 保障技术实现

3.1 云计算支撑环境安全

针对云计算依托的网络空间设施，通过虚实结合的安全技术，提供自主式、按需安全防护保障，切实满足云计算环境的各类安全需求。面向云计算环境中物理层至应用层进行集成式防护，精确识别各层数据流量，具备完整安全防护能力。实现完整的 2 ~ 7 层网络数据安全保护，提供访问控制、入侵防御、蠕虫防护、漏洞保护、Web 应用安全保护、风险评估、终端保障、代码审计等功能，实时防御来自外部网络的非法访问、入侵、蠕虫、病毒、木马、漏洞攻击、Web 攻击、应用攻击等威胁行为，确保云计算环境中网络和业务系统持续安全运行。云计算支撑环境安全防护如图 2 所示。

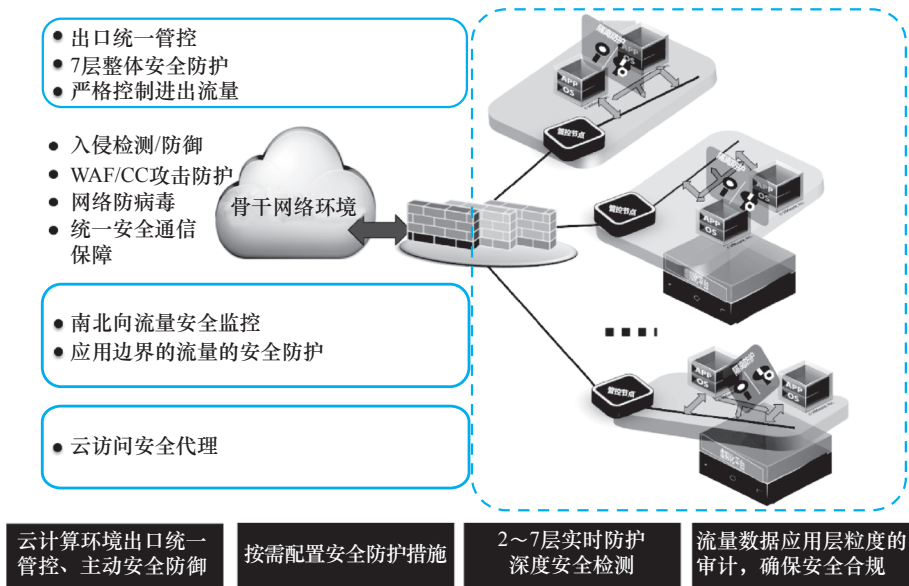


图 2 云计算支撑环境安全防护

1. 网络病毒防护

针对云计算环境进行网络级病毒防护，查杀病毒、木马、僵尸客户端等威胁，防范针对云平台的病毒入侵行为。在中国科技云骨干接入层面中对 HTTP、FTP、SMTP、POP3 等协议流量进行病毒过滤查杀，包括文件压缩（zip, rar, 7z 等）中的病毒，实时更新病毒样本，目前病毒特征库达到百万级，可实时、有效地防范病毒传播。

2. 入侵检测与防御

云环境中大量的系统和业务应用会成为攻击的重点，因此需要有效的手段全面防御应用层攻击，防止云平台内各类应用安全保护上出现短板。针对云计算环境内主机和业务应用系统进行安全漏洞检测、防护，如后门漏洞、操作系统漏洞、ftp 工具漏洞、数

数据库漏洞等，提供实时的漏洞发现和防护能力，能够实时防护针对操作系统、应用程序的漏洞攻击，如 HTTP 服务（Apache、IIS 等）、FTP 服务、Mail 服务、OpenSSH、Mysql、Oracle 等进行安全防护，以及后门程序预防、协议脆弱性保护、exploit 保护、网络共享服务保护、shellcode 预防、间谍程序预防等。针对特定攻击，如 SQL 注入攻击、跨站脚本攻击、CSRF 跨站请求伪造、网站扫描、文件包含漏洞攻击、目录遍历漏洞及弱口令风险，进行针对性防护保障，通过系列安全防护措施进行纵深防御，结合应用攻击的静态规则及基于攻击过程的动态防御机制，实现双向的内容检测，提供各类应用安全威胁的攻击防护能力。

基于云环境出口流量进行入侵监测，检测木马、恶意代码、间谍软件、后门等。云计算环境内部主机感染病毒、木马后，试图与外部网络通信时，准确识别该流量，并根据策略进行阻断和记录日志。准确定位问题终端，阻断其网络流量，杜绝非法恶意行为，起到良好的安全防护效果。

### 3. 云访问安全代理

建设云访问安全代理环境，为应用安全云服务、主动安全防御等系列安全服务提供统一接入环境，针对云环境中各类应用系统，建设统一安全管控平台。通过链路加密、集中登录、双因素等安全机制结合模式，保障管理流量链路加密、统一管控、操作审计。实现用户对其业务系统管理时的多维度保障，实现业务系统管理行为的安全、统一化管理，满足相关信息安全要求。

### 3.2 云环境安全

在云计算虚拟化环境下，对不同业务应用虚拟机间的流量进行安全防护和管控。通过虚拟化安全技术措施，如虚拟防火墙、虚拟入侵防御、虚拟防病毒等，形成虚拟化环境中南北、东西向流量的集成式安全保障。云内部环境的安全管控模式如图 3 所示。

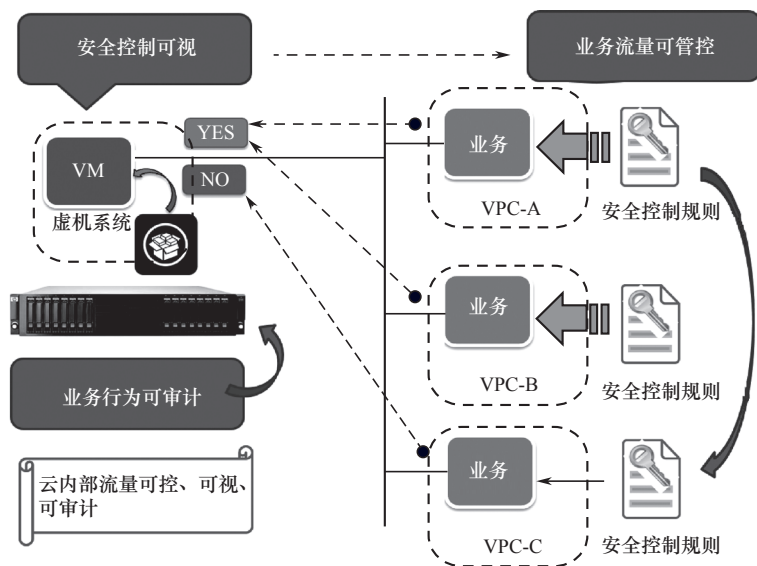


图 3 云内部环境的安全管控模式

针对云内部环境中 2 ~ 7 层安全防护和应用的业务保障,采用虚拟化无代理模式实现精细域划分与可视化的权限访问控制。例如,安全域、接入控制、病毒防护、入侵防护、漏洞检测、Web 安全防护、数据泄露保护等。通过安全软件资源池,可以实现按需分配、灵活部署的安全保护。

云计算环境中划分出各租户的边界并予以安全隔离控制,鉴于云的特征,将每一个租户划分成一个独立的虚拟区域,在此之上形成不同安全等级安全域,并在每一个区域使用虚拟防火墙进行区域之间的隔离,从而避免不安全等级业务之间的数据互访造成安全隐患。

将虚拟防火墙以虚机的方式部署在租户虚拟网络和云网络的边界,针对租户应用系统的东西流量安全防护和隔离,包括租户间的安全隔离,防止非法人员从云平台内部进行安全攻击;租户应用对外的安全防护和隔离,防止非法人员从外网、互联网进行安全攻击。

### 3.3 深度安全保障

#### 1. 安全检测

进一步提升云环境中安全威胁深度检测能力,构建流量牵引、分发、检测、回注安全检测环境,进行流量清洗、深层入侵检测、数据流审计等安全保障。根据重要业务系统、重点终端的业务流量、日志特点,通过细粒度的流量层次划分,进行 0-DAY 漏洞发现、APT 等安全攻击的深度检测。

#### 2. 风险评估

基于平台级漏洞扫描分析与测试验证系统,以 1+N 分布式集群架构提供全方位安全隐患分析与风险评估。工作任务并行批量调度,提供信息系统后台、网站系统、中间件等专项漏洞检测,提供多模式注入、跨站点攻击及伪造跨站点请求等多环境技术验证方式,进一步建立威胁预警与主动防御相结合的机制,为系统风险评估提供有效技术手段。

#### 3. 业务审计

基于云计算环境安全审计平台,实现对云内发布内容进行审计,及时发现业务系统流量中存在的违法、违规信息。对可识别内容的应用协议,如邮件、HTTP、FTP 等应用的传输内容进行检查,发现违规信息实时记录并报警。

对于攻击及违规信息记录原始通信流量。在原始流量中进行日志记录,提供流量日志和行为日志等。流量日志可提供流量相关信息,行为日志提供用户活动日志、用户行为信息(登录 IP、访问资源、时间、认证方式)、用户活跃程度、用户/用户组流量排行及查询、用户/用户组流速趋势及查询等。

#### 4. 代码审计

面向云环境中各项业务应用系统提供主动模式自服务代码审计安全服务,安全审计贯穿业务系统全生命周期,以白盒测试模式检测软件系统代码中存在的安全漏洞。针对

系统开发过程中的编码阶段、测试阶段、交付验收阶段，对各阶段系统源代码进行安全审计检测，利用数据流分析引擎、语义分析引擎、控制流分析引擎等技术，对源代码安全问题进行分析和检测并验证，提供业务系统安全质量方面的真实状态信息。

## 4 总结与展望

中国科技云安全保障从支撑环境、云内环境、深度检测三个角度，在平台安全性、租户安全性、业务系统安全性、业务数据安全性、业务接入安全性等方面整体构建云平台的安全体系，从平台稳定性、业务稳定性等角度来保障云平台上各租户的业务系统高效、可靠、稳定、安全地运行。

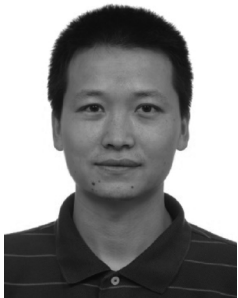
针对中国科技云虚拟化环境，提供灵活、自主、按需、可视的融合安全保障平台，多种方式集成业界先进技术与产品，各安全防护功能以虚拟化软件形式部署，以虚拟化形式存在于安全防护平台中，自动适配 VMware、KVM、XEN 以及国内虚拟化平台业务环境，以路由、单臂、vSwitch 等部署方式实现安全检测，数据流量经过设备安全检测与防护后到达业务系统，从而保障业务系统的安全。

未来需要进一步加强云计算环境下的安全保障能力，加强中国科技云重要应用环境的网络安全预警、监控、应急响应能力。加强中国科技云计算环境中深度检测异常流量信息的粒度，增强针对云平台用户攻击的全局预警能力，保障中国科技云用户的网络信息安全，进一步增强包括内容审计、网站安全、链路安全防护在内的重要信息安全支撑保障能力。提升云计算环境流量分发平台能力，为安全态势感知等应用系统提供原始流量按需输出。对于未知攻击模式检测，需要集成式安全功能联动，结合大数据挖掘与智能 AI 模式深度识别技术，通过安全云平台自动化实现安全威胁的可控管理。基于协议无感知安全服务链编排等关键技术，全面完善安全保障环境，为计算与数据平台提供安全的链路保障与接入管理安全环境，全面提升云计算环境中的安全保障能力。

### 参考文献

- [1] 中国科学院信息化工作领导小组办公室. 科技云总体实施方案, 2012.
- [2] 中国科学院信息化工作领导小组办公室. 网络安全保障体系建设工程实施方案, 2016.

### 作者简介



龙春，中共党员，工学博士，高级工程师。中国科学院计算机网络信息中心网络空间安全技术与应用发展部主任。工作期间主持多项国家级项目，其中包括基于 CNGI 的科研信息基础设施建设和应用示范工程项目、国家下一代互联网安全专项、国家发改委信息安全专项等。另外还负责了多项院级科研项目，包括中国科学院安全保障与服务工程、安全专项项目等。主要从事计算机网络与信息安全、安全数据挖掘与分析以及下一代互联网络体系结构等方面的研究工作。近年来发表技术规范、期刊和学术会议论文等 10 余篇，并获得多项专利和软件著作权。

第三篇  
面向国民经济主战场篇







## 中国农业科学院科技云基础架构设计

郑火国 姜丽华 胡海燕 田 乐 刘艳超 曹景军

(中国农业科学院农业信息研究所)

### 摘 要

农业科技云是纳入中国农业科学院 2015—2017 年信息化规划中的重点任务,其目标是实现全院网络、计算、存储以及应用等分散在各个研究所科研资源的整合共享,进而提升全院科技创新能力。本文介绍了农业科技云构建思路及技术架构,对云平台网络、虚拟化、存储备份、安全等方案设计进行了阐述,最后探讨了农业科技云在中国农业科学院的未来发展方向。

### 关键词

云计算;基础架构;科研网络

### Abstract

The science and technology cloud of is an important project in Chinese Academy of Agricultural Sciences informatization planning from 2015-2017. The cloud aims at realizing the integration of network, computing, storage and application of scattered in various scientific research resources, and enhance the ability of innovation of science and technology of CAAS. This paper presents the ideas and techniques of construction of the cloud, introduces the designing scheme of network, virtualization, storage and backup, security. Finally, the future development direction of the cloud is discussed briefly.

### Keywords

Cloud Computing; IT Infrastructure; Research Network

## 1 引言

云计算通过网络将分散的计算、存储、软件等资源进行集中管理和动态分配,使信息技术能力如同水和电一样实现按需供给,具有快速弹性、可扩展、资源池化、广泛网络接入和多租户等特征,是信息技术服务模式的重大创新。

云计算是未来信息化基础设施的大趋势,同时还是大数据分析处理的重要基础。在国内的科研单位,中国科学院计算机网络中心已通过中国科学院“十二五”信息化专项,建成国内首个科研云平台,涵盖基础设施云服务、数据存储与管理云服务环境、海量科学数据分析与应用示范、科学数据整合与共享服务,未来,科学院面向全院及社会公众服务的系统都将陆续迁移至云平台中。

对于中国农业科学院来说,构建中国农业科学院私有云平台,应用云计算技术整合

改造现有信息系统，实现农科院各信息系统的整体部署和共建共用，不仅能有效解决分散建设、运营成本高、安全风险大等一系列问题，还可以将科研数据资源集中，为基于大数据的科研管理奠定基础。

中国农业科学院信息化发展规划（2015—2017 年）中明确提出了“构建云计算平台，提供计算资源目录访问，实现分散资源的有效挖掘、融和、共享”的任务<sup>[1]</sup>，以提升科技创新能力。2017 年，启动了中国农业科学院农业科技云平台建设，拟搭建基于云计算技术的信息化基础设施环境。

## 2 农科云建设需求分析

截至 2017 年 11 月，据不完全统计，中国农业科学院中关村院区 12 个研究所正在运行的各类应用系统约 500 个，涉及服务器 500 余台。仅中国农业科学院农业信息研究所就拥有物理服务器近 300 台，购置年份从 2007 年至 2016 年不等，其中 80% 以上的服务器使用超过 5 年。通过前期调研发现，现有的信息化基础设施在运行中普遍存在两大问题：一方面，绝大多数服务器上部署了 1 个应用系统或数据库系统，服务器 CPU、内存使用率不足 10%，导致大量的机房空间、电力的浪费，造成了投资的浪费；另一方面，随着科研信息化的发展，支撑科研、管理的各类应用系统正不断开发、上线应用，缺少支撑这些业务系统运行的 IT 设备，即使购置新设备，从设备采购到业务系统上线运行时间周期长，严重影响了业务系统上线运行的进度要求。

针对中国农业科学院的现实需求，结合云计算技术的特点，农业科技云（以下简称“农科云”）的构建将重点解决以下问题：

（1）提高服务器等 IT 设备的利用率。与传统 IT 架构相比，虚拟化技术能显著提高服务器、存储器等设备资源利用率。在云计算环境中，资源占用大的应用程序可以运行在虚拟化主机的裸机体系结构上。该结构可提供高级内存管理功能，并支持物理机和虚拟机的纵向扩展。用户也可以在运行虚拟机时使整合率翻一番，并最大限度地提升对 CPU、内存、硬盘空间的资源利用率。

（2）有效降低服务器和存储购置成本。随着处理器功能的日益强大，以及该套件不断扩展以适应最苛刻的企业工作负载条件，越来越多的应用可以运行在云计算环境中。根据业界实践经验，资源池模式相比传统模式，资源利用率可提高 3 倍以上，整体 IT 总成本可降低 30%。

（3）缩短业务上线时间，业务需求做到及时响应。当有新的应用需要部署时，平台能够满足快速部署的要求，部署完成后存储、网络无须进行额外配置，能快速调整以适应新的 IT 应用的需求。

（4）提高业务系统连续性。云计算可以提高几乎所有应用系统可用性的基本级别，确保满足服务级别协议的要求。可以大幅缩短计划内停机时间，防止计划外停机，并快速实现故障恢复，主要体现为：消除常见维护操作造成的计划内停机；提供独立于硬件、操作系统和应用程序的更高可用性；通过虚拟机自动重启，快速实现操作系统和服

务器故障恢复。

(5) 提高数据整合能力。对于任何单位的管理部门来说,在充分认识到数据的重要性之后,还需要有足够的人员和能力去整合、搭建和完善数据管理基础架构。有了云平台之后,各单位可以将各类应用系统及数据进行整合,有利于数据科学家对其进行分析和挖掘,使其产生额外的价值。

### 3 设计思路与技术架构

#### 3.1 设计思路

农科云的构建在整体架构上将遵循先进性、整合性、共享性、可靠性、经济性、可扩展性和可管理性原则。

(1) 先进性。整体架构设计具备一定的先进性和前瞻性,符合信息技术发展的方向和潮流,可以满足未来的需求。

(2) 整合性。通过云平台实现信息基础架构、信息资源的整合,最大限度地发挥资源的能力,实现统一部署和管理。

(3) 共享性。采用虚拟化技术,实现网络资源、计算资源、存储资源、管理资源的共享,通过“虚拟”资源池实现资源的动态分配和调整,管理人员只需通过管理界面进行简单的配置和调整,就可以对系统架构进行优化和改进。

(4) 可靠性。采用成熟、稳定的技术和产品,实现信息化基础架构的高可靠性和高可用性,对关键业务数据进行必要的保护,整体系统具备防范设备故障的能力。

(5) 可扩展性。伴随科研管理业务的不断发展、管理水平的持续提升,对系统的要求也会随之变化,因此系统应具备良好的扩展性,可方便地进行横向和纵向扩展。

(6) 经济性。系统须基于成熟稳定的产品,充分考虑已有设备的利用和延续,降低实施成本、运行风险,以及系统后续的运营维护成本、人力资源成本。

(7) 可管理性。设备需要全部支持可集中功能,方便日常维护和故障排查,提高运行维护的效率。

#### 3.2 技术架构

从云计算的视角看,农科云属于私有云。农科云不同于中国科学院的科技云,科技云采取了类似公有云的建设思路,除了为科学院下属研究所提供服务外,还对科学院外的其他科研单位提供云计算服务<sup>[2]</sup>。

按照私有云的设计思路,采用通用、成熟的技术和方案,进行农科云整体架构设计。农科云的整体技术架构主要从基础设施虚拟化、按需提供服务、应用系统泛在访问三方面为用户提供服务。基础设施虚拟化和按需提供服务是云计算的基本特征,农科院各下属研究所、业务团队在使用农科云时,无须关注数据中心机房、网络、计算、存储

等基础设施的具体情况，只需要提出对上述资源的实际需求，通过云平台的资源分配机制即可满足其要求。泛在访问是指随着智能移动终端和无线网络的发展，农科云上部署的各类应用及服务要延伸至科研各个环节，方便科研人员随时随地获取计算、数据等各种服务。

农科云的总体技术架构如图 1 所示。云 IT 基础设施和服务层是农科云总体架构中的关键，通过虚拟化技术，农科云实现了计算、存储、网络、安全等资源的虚拟化，通过资源池及自动化资源调度层向服务层提供接口，支撑各类应用系统的运行<sup>[3]</sup>。

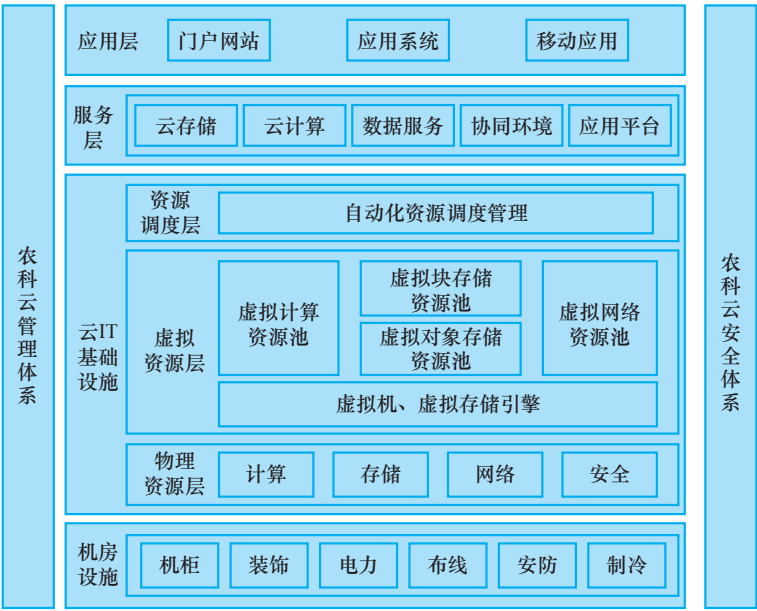


图 1 农科云的总体技术架构

随着科研方法、手段的不断发展，农业遥感数据、文献数据、基因组数据等科研数据正以几何级指数在增长，以大数据思维开展农业研究已日益成为主流，农业研究正进入大数据时代。农科院各下属单位正在建设各类大数据处理平台，未来需要按照高性能计算云服务的架构对各单位计算平台进行整合，实现更广泛意义上的“云计算”平台。

## 4 农科云平台基础架构方案设计

### 4.1 云平台基础架构整体方案设计

农科云平台将按照分期建设的原则，有步骤、有重点地推进。前期围绕基础架构开展，重点进行云平台基础网络、虚拟化资源池（计算、存储）、安全等建设。农科云平台基础架构整体方案如图 2 所示。



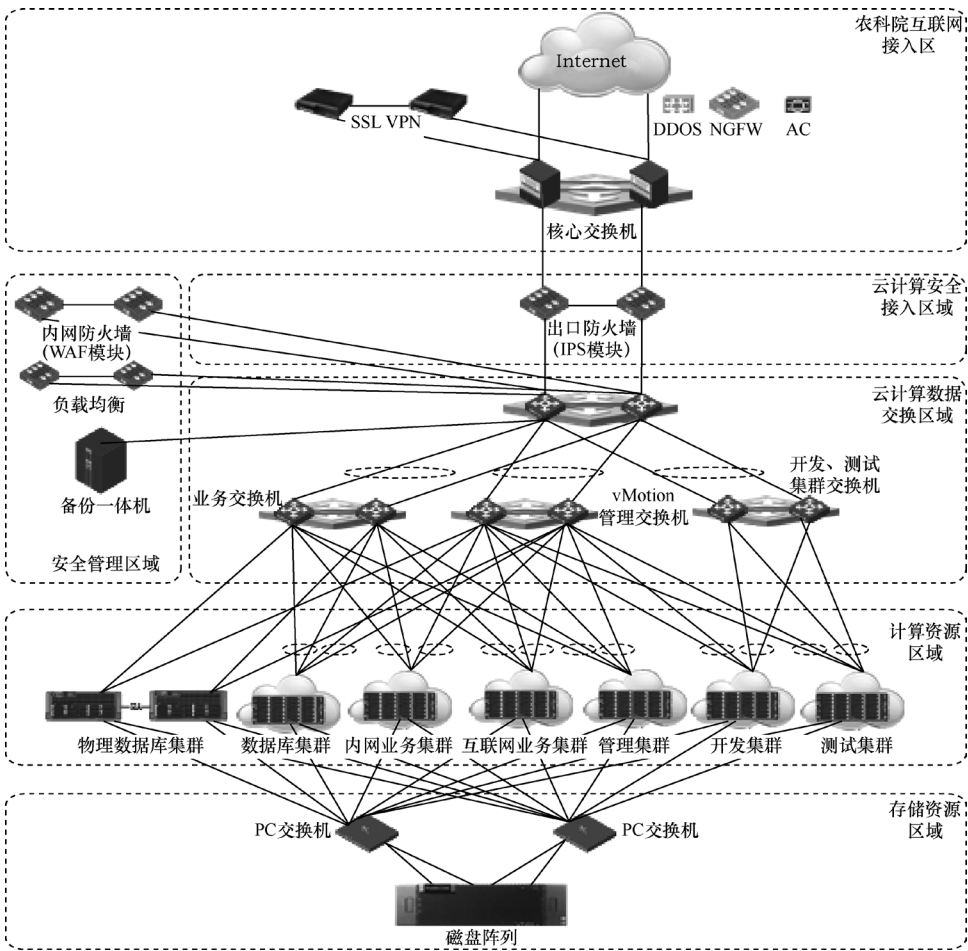


图 2 农科云平台基础架构整体方案

4.2 网络规划设计

在基础网络部分，采用云计算架构典型的业务网络与管理网络分离的方式，与计算资源构建类似，逻辑上分为物理网络与虚拟网络。

4.2.1 物理网络规划

农科云基础网络承载着农科院重要业务流量，为了满足云计算大流量快速转发的要求，本次骨干网络设计为全万兆互连；同时为了避免网络设备单点故障导致的业务中断，网络中所有关键设备均采用双设备冗余设计。

农科云计算网络采用核心层、接入层两层架构组网。两层架构网络部署因减少中间汇聚层，简化了网络结构、提高了数据转发效率。考虑到两层架构设计缺少的扩展性，在核心交换层采用高端框式交换机通过扩展板卡的方式进行网络扩展。

因农科院现网采用 OSPF 路由协议，因此本次云计算网络与现有网络对接同样采用 OSPF 路由协议，OSPF 运行范围如图 3 所示。

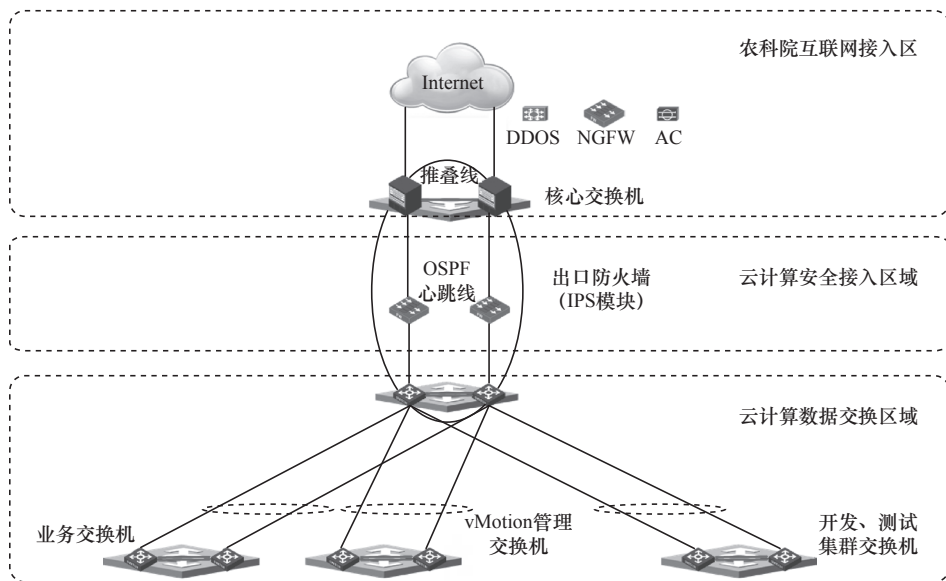


图3 OSPF 运行范围

#### 4.2.2 虚拟网络规划

虚拟网络需配置 Management Network、vMotion Network、业务 Network，分别配置单独的 VLAN。根据最佳实践，Management Network、vMotion Network 配置在虚拟标准交换机上，便于管理与排错；业务网络配置在 dvSwitch0 的虚拟分布式交换机上，便于变更配置与统一管理，具体如图 4 所示。

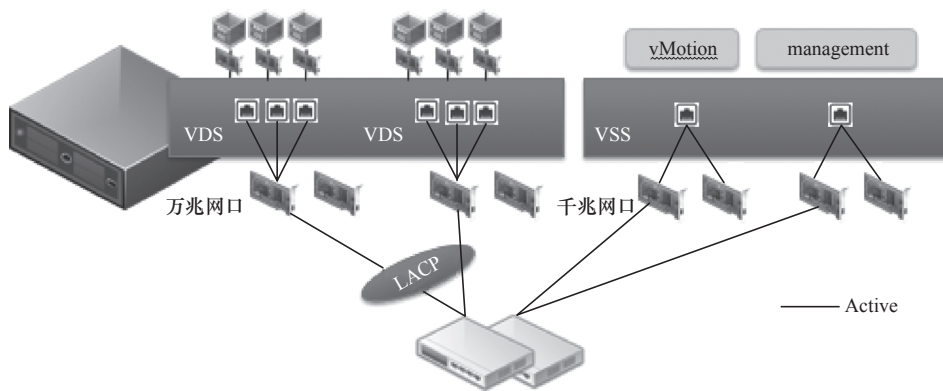


图4 虚拟网络关系

Management Network、vMotion Network 配置到虚拟标准交换机 vSwitch0 上，vSwitch0 上行链路分配两个千兆网卡。Management Network、vMotion Network 流量采用双活模式配置，实现冗余。业务 Network 配置到虚拟分布式交换机 dvSwitch0 上，dvSwitch0 的上行链路分配两个万兆网卡，配置 LACP 绑定，提供最大带宽，实现双活模式冗余（见图 5）。

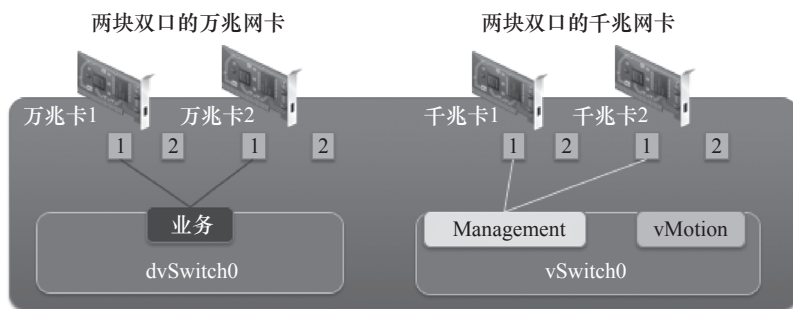


图 5 虚拟网络与物理网络对应关系

### 4.3 虚拟化集群规划设计

#### 4.3.1 虚拟化计算资源池规划

利用虚拟化软件对服务器进行虚拟化，每台服务器上都安装配置虚拟架构套件软件，用于在单个物理服务器实体上，将强大的计算资源拆分成为虚拟机提供给不同的应用，并按照不同的业务组成不同的资源池加以管理，充分利用服务器资源。对于每一个虚拟服务器，无论是从功能、性能和操作方式上，均等同于传统的单台物理服务器。

但是对于核心数据库业务的服务器，仍运行在企业级服务器的物理硬件平台上，确保核心数据的稳定性，并采用第三方独立的双机软件，确保数据系统的高可用性。

#### 4.3.2 服务器集群规划设计

针对农科院不同的业务需要，农科云虚拟化平台将服务器按照业务类型进行划分，共规划设计了 7 个集群，分别是数据库集群（包括物理数据库集群和虚拟化数据库集群）、内网业务集群、互联网业务集群、管理集群、开发集群资源池、测试集群，这七个集群中，除物理数据库集群外，其他均通过虚拟化技术实现。这些集群资源池，针对不同的业务区域进行划分，实现安全隔离，便于统一管理、简化资源分配及权限设定。各集群功能设计如表 1 所示。

表 1 各集群功能设计

序号	集群名称	主要功能
1	物理数据库集群	面向全院服务的重要业务系统（如协同办公系统、邮件系统）的数据库部署在物理机构建的集群上
2	数据库集群（虚拟机）	其他业务系统的应用系统与数据库分离，数据库集中部署
3	内网业务集群	用于部署不对互联网发布，只在单位内部使用的业务系统
4	互联网业务集群	用于部署面向互联网发布的业务系统
5	管理集群	用于监控云平台网络、物理服务器、虚拟服务器、安全管理等
6	开发集群	用于单位内部应用系统开发环境，系统开发完成后迁移至测试集群进行测试
7	测试集群	用于单位内部应用系统上线前测试，测试完成后迁移至内网业务集群或互联网业务集群

#### 4.4 存储及备份规划设计

在云计算环境下，不同的租户、不同的业务应用对存储有着不同的需求，需要底层存储设备具备灵活的策略支持，允许用户按需进行存储的策略配置。

##### 4.4.1 存储规划设计

按照农科云基础架构规划，未来将构建混合存储架构，既包括传统的 SAN、NAS 存储，还将引入软件定义存储，充分利用各类存储设备的特性，满足多种业务需求。项目建设初期，考虑到业务系统数量、平台规模及预算等因素，拟通过配置一套光纤存储阵列产品，配置冗余的光纤交换机，组成标准的 SAN 集中存储架构，由虚拟架构套件生产出来的虚拟机的封装文件都存放在存储阵列上。通过共享的 SAN 存储架构，可以最大化地发挥虚拟架构的优势，在线地迁移正在运行的虚拟机，进行动态的资源管理，实现资源的即插即用。

存储产品作为数据中心的核心存储，将采用双冗余 SAN 网络架构，同时提供 NAS 功能，支持多种连接协议。在选型方面，存储设备需支持不同类型磁盘混插，包括 SSD 硬盘、SAS 盘及 SATA 盘，同时需具备能显著提升效率并节省成本的分层技术。

##### 4.4.2 备份规划设计

与传统业务架构需要数据备份系统一样，农科云平台在优化虚拟化系统的同时，数据的备份保障措施必不可少。对数据进行备份的需求，不仅包括应用程序数据和用户数据，而且还包括系统配置、操作系统等。因为虚拟化基础架构的特性，虚拟机的所有数据封装在几个独立文件中，因此虚拟化大幅简化了对系统所有数据的备份与恢复过程。

考虑到传统的备份软件 + 磁带库 / 光盘库 / 盘阵的备份模式，涉及的软硬件产品多、技术多元化，备份系统部署复杂、维护性较差；而与之相对应，备份一体机具备部署简单、性价比高、维护简单、方便易用等优势。针对农科云平台业务系统，拟采用备份一体机解决方案（见图 6），实现农科院 Oracle、MySQL 等数据库，Linux、Windows 等系统文件，以及虚拟机系统等备份，提高系统数据的安全性。

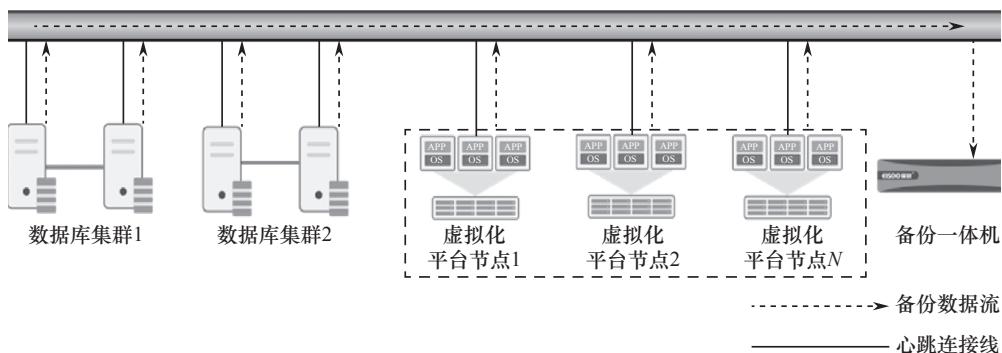


图 6 基于备份一体机的集中备份方案

如图 6 所示，在农科云平台中接入一套备份一体机，集中备份现有业务系统数据。对于数据库环境，需在每台服务器中安装一个备份客户端，备份系统自带 Linux 及

Windows 下的客户端软件；客户端安装完成后，由备份一体机控制台发出备份指令，按照既定策略实现数据备份。对于 VMware 虚拟化环境，备份一体机可通过与虚拟化平台自身 API 接口的对接抽取平台数据，以实现无客户端代理的集中备份。

#### 4.5 安全规划设计

云计算技术给传统的 IT 基础设施、应用、数据以及 IT 运营管理都带来了革命性改变，对于安全管理来说，同样如此，采用云计算架构后，带来了新的信息安全风险<sup>[4]</sup>，尤其是要满足 2017 年实施的《网络安全法》及新的等级保护规范要求。

依据信息系统安全防护要求，云平台安全防护围绕网络防护、应用防护、主机防护、管理防护、虚拟化平台防护五个层次展开。本文重点针对网络安全、虚拟主机安全及应用安全进行阐述。

##### 4.5.1 网络安全设计

在图 2 中，云平台网络出口的两台防火墙（加配 IPS 模块）以三层主备模式部署，对来自云平台外部的流量进行过滤，为云计算网络提供互联网接入安全防护。在核心交换机旁挂两台防火墙以三层主备模式进行部署，实现内网安全防护。同时，根据不同业务划分出不同的安全域，不同安全域基于 VLAN 隔离，业务系统需要互访时，通过策略将流量引至内网防火墙进行过滤，然后再将流量转发到目的业务区域。与此同时，在核心交换机旁挂两台 SSL VPN 设备，为互联网用户提供安全加密隧道，保障网络通信的安全。

##### 4.5.2 虚拟主机安全及应用安全设计

随着云计算的发展及虚拟化技术的应用，服务器边界变得越来越模糊，传统防火墙已经无法支持虚拟化环境中网络边界的防护，除了针对服务器的传统攻击手段之外，又出现了新的针对虚拟化服务器的攻击手段，在多租户虚拟化环境下无法有效做到资源的隔离和防护。

为了解决传统安全防护在云计算环境中面临的问题，在农科云环境中部署一套针对服务器及应用系统的纯软件化安全解决方案，在每台虚拟化服务器上安装安全代理软件提供网络层、系统层和应用层多个层面的安全监控和保护，（见图 7）在管理集群中部署私有云安全管理平台，根据收集到的日志进行快速分析及挖掘，准确定位攻击事件及攻击轨迹，并第一时间进行预警。

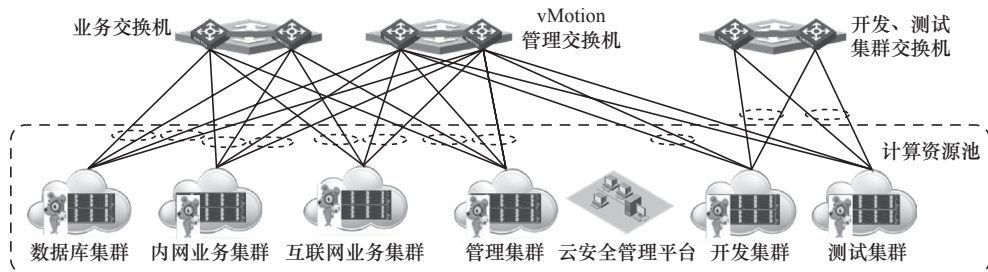


图 7 基于软件方式服务器及应用系统防护

与此同时，如图 2 所示，在安全管理区的内网防火墙上加置 WAF 模块，通过核心交



换机上的引流策略,将访问 HTTP、HTTPS 业务流量引至 WAF 设备,为门户网站及应用系统提供应用层安全防护。

## 5 总结与展望

为拥抱云计算、大数据、物理网等新一代信息技术的到来,中国农业科学院积极谋划,采用虚拟化、分布式存储等云计算关键技术,构建农业科技云平台,打造面向全院的新一代信息化基础设施平台,实现 IT 硬件资源的集中化管理,缩短了业务系统的部署和升级时间,有效地降低了信息化建设的 TCO。摆脱了应用系统与物理硬件的束缚,为农业科研资源的整合共享奠定了基础。

然而,我们要清醒地看到,中国农业科学院云平台建设还处于初级阶段,农科院现有的网络和计算能力与科研人员快速增长的需求仍有较大的差距,从基础设施(IaaS)到平台(PaaS)、软件(SaaS)还有很长的路要走。随着农业遥感、生物信息学、农业物联网、智能装备等研究的深入,信息技术日益渗透到农业科研过程中,未来,对高性能计算、大数据分析、知识服务等需求会不断涌现并提出新的更高的要求,会有越来越多的平台、系统出现在农科云上。希望农科院能抓住难得的历史机遇,深化农科院科研资源的整合共享,在中国农科院云平台建成后,为全院 34 个研究所、300 多个创新团队提供各类信息化服务。

### 参考文献

- [1] 中国农业科学院信息化工作领导小组办公室. 中国农业科学院信息化发展规划(2014—2025), 2014.
- [2] 南凯,黎建辉,武虹,等. 中国科学院科技云现状与展望. 中国科研信息化蓝皮书[M]. 北京:科学出版社,2015.
- [3] 顾炯炯. 云计算架构技术与实践[M]. 北京:清华大学出版社,2016.
- [4] 陈驰,于晶. 云计算安全体系[M]. 北京:科学出版社,2014.
- [5] 雷万云. 云计算技术、平台及应用案例[M]. 北京:清华大学出版社,2011.
- [6] Michael J. Kavis. Architecting the Cloud: Design Decisions for Cloud Computing Service Models. Wiley, 2016.
- [7] 龚奕利,贺莲,胡创. 云计算概念、技术与架构[M]. 北京:机械工业出版社,2016.
- [8] 武永卫,秦中元,李振宇,等. 云计算与分布式系统:从并行处理到物联网[M]. 北京:机械工业出版社,2016.

### 作者简介



郑火国,博士,副研究员,硕士生导师。主要从事农业信息技术、网络技术研究,现任中国农业科学院农业信息研究所网络中心副主任。主持和参与国家 863 计划、国家科技支撑计划、农业部专项等科研项目 20 余项,获省部级奖励 3 项,发表论文 30 余篇。

## 农业经济空间信息服务关键技术与应用平台—— 中国农业经济电子地图

刘升平

中国农业科学院农业信息研究所

### 摘 要

经过三十多年的信息积累与潜心研究,“农业经济空间信息服务关键技术与应用平台(中国农业经济电子地图)”建立了我国最大的分县农村经济基础资料数据库,以研究农业经济数据管理、分析、决策服务为主线,开展了长期跨学科、跨部门的技术开发与应用,从数据管理、信息分析和决策服务三个方面开展研究工作,为各级农业决策部门、科研单位、农业生产部门等提供了卓有成效的信息服务,促进了农业与社会、经济、环境协调发展,对实现我国农业和农村信息化发展起到了积极的推动作用。成果在国内外开展了广泛的技术交流,先后荣获 2012 年中国农业科学院科技进步一等奖和 2013 年北京市科技进步二等奖。

### 关键词

空间信息服务;电子地图;农业经济;智能服务

### Abstract

Taking agricultural economic data management, analysis and decision service as the main line, Key Technology and Application Platform of Agricultural Economic Spatial Information Service (Chinese Agricultural Economic Electornic Map) established the largest country rural economic basic database, carried out long-term interdisciplinary application and research, provided excellent information services for the agricultural decision making departments through three aspects which included data management, information analysis and decision service.

Establishment of Chinese Agricultural Economic Electornic Map played an active role in the development of rural and country informatization in China, and stimulated the economic, social and environmental development. At the same time, our achievement carried out widely academic cooperation with colleagues both at home and abroad, and was awarded the prize of Scientific and Technological Advancement by Beijing and Chinese Academy of Agricultural Sciences successively.

### Keywords

Spatial Information Servia; Electornic Map; Agricultural Economic; Inteligent Service

中国农业科学院农业信息研究所智能农业技术研究室从 20 世纪 80 年代初开始在计算机上进行农村经济基础资料数据的采集、管理与服务,经过 30 多年的信息积累与潜心研究,建立了我国最大的分县农村经济基础资料数据库,以研究农业经济数据管理、分析、决策服务为主线,开展了长期跨学科、跨部门的技术开发与应用,从数据管理、信息分析和决策服务三个方面开展研究工作,取得了“农业经济空间信息服务关键技术与应用平台(中国农业经济电子地图)”的研究成果,为各级农业决策部门、科研单位、农业生产部门

等提供了卓有成效的信息服务,促进了农业与社会、经济、环境协调发展,对实现我国农业和农村信息化发展起到了积极的推动作用。成果在国内外开展了广泛的技术交流,先后荣获 2012 年中国农业科学院科技进步一等奖和 2013 年北京市科技进步二等奖。

## 1 背景

我国农业部自 20 世纪 80 年代初开始在计算机上建立了分县农村经济基础资料数据库,经过 30 多年的积累,拥有了一批相当宝贵的信息资源,这些信息已经成为各级农业决策部门、科研单位、农业生产部门进行生产管理、宏观决策的重要依据。但长期以来,在农业经济信息资源的管理和利用上仍然存在诸多方面的技术难题:一是农业经济数据采集和管理不规范,主要体现在统计指标缺乏统一标准、数据存放分散难管理、数据共享与交换困难,严重影响了信息的利用效率,迫切需要建立农业经济信息的管理规范,实现数据的集中式、规范化管理;二是农业经济数据分析缺技术、少系统、自动化程度低,严重影响了对农业经济数据中深层次信息的挖掘和分析,迫切需要开展相关农业经济数据分析技术和系统的研发<sup>[1]</sup>;三是针对农业经济信息开展的决策分析服务存在缺乏直观化的展示手段、面向的服务终端单一、诸多决策分析服务之间难以协同等问题,严重影响了决策服务的效果<sup>[2]</sup>,迫切需要建立农业经济信息空间服务平台(中国农业经济电子地图数据服务平台)。

针对这些问题,中国农业科学院农业信息研究所智能农业技术研究室自 20 世纪 90 年代开始在“农业信息系统应用软件研究和开发(863 计划)”“农业经济管理与政策法规信息系统(‘九五’科技攻关计划)”“农业宏观管理与决策信息化技术研究(‘十五’重点科技攻关)”“农业资源利用与管理信息化技术研究与应用(‘十一五’科技支撑)”等多个课题中开展了针对农业经济数据的宏观决策分析、应用软件研发等专题研究;同时,随着空间信息技术的不断成熟和在其他领域的广泛应用,2007 年农业部市场与经济信息司启动了“中国农业经济电子地图”项目,研究将空间信息技术应用到农业经济信息的管理、服务之中。

项目组在这些项目的基础上,经过长期的研发,已经形成了一批可以推向应用的软件系统,达到了盘活和挖掘农业经济基础资料信息、为农业宏观决策和分析提供便携的信息技术服务工具的目标。在农业资源信息的有效组织和管理、提高区域农业资源的利用效率、提高对农业突发事件的分析和把控能力等方面起到了重要作用,为相关部门提供了有效而准确的信息服务,将促进农业与社会、经济、环境协调发展,实现我国的可持续农业和农业信息化。

## 2 关键技术架构

农业经济空间信息服务关键技术与应用平台是围绕中国农业经济统计数据展开的以规范化的数据管理为基础、系统性的数据分析为关键、直观化的数据决策服务为目的的完整技术体系。为了从根本上解决现有农业经济统计信息的管理缺规范、分析少技术、展示不直观等问题,项目围绕数据管理、数据分析和决策服务 3 个环节,针对中国农业

经济数据库建设、农业经济信息分析模型、区域产业优势分析、农业生产优化布局、农业经济空间信息分析、农业常态灾害与突发事件专题分析、农产品市场价格动态分析、农村居民收入差距分析、农产品市场价格动态分析、基于 Agent 的农业经济信息分析与群决策和中国农业经济电子地图决策服务平台构建等核心内容开展研究<sup>[3]</sup>，取得了突破性创新成果。项目技术架构如图 1 所示。

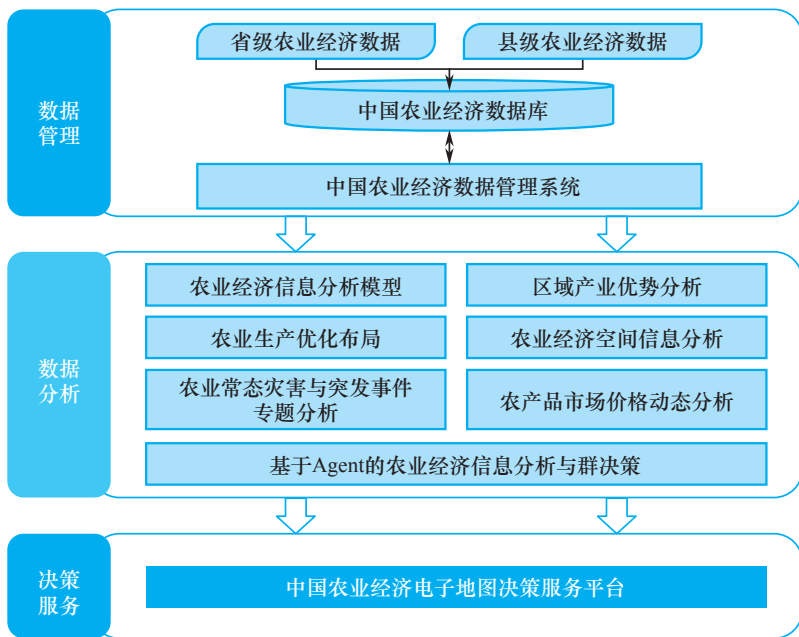


图 1 项目技术架构

农业经济空间信息服务关键技术与应用平台（中国农业经济电子地图）在创建了中国最大的农业经济基础资料数据库的基础上，针对时间长序列、行政区划不断变动、指标单位不统一等问题，开展了数据规范化与智能化处理技术研究；针对长期缺少农业经济信息分析工具，特别是缺少灵活性强、适应行业需求的信息技术手段和软件等问题，集成应用数据库、GIS、GPS、模型和智能技术，围绕数据库管理、农业经济分析和预测模型、基于 Agent 的农业经济分析与群决策和农业经济电子地图服务平台构建等一系列核心技术内容开展了以系统性的数据分析与辅助决策技术为关键、直观化的决策服务为目标的技术体系研究，取得了突破性创新成果，主要研究进展如下。

## 2.1 中国农业经济数据库建设

中国农业经济数据库建设作为科学管理和有效利用农业经济数据的重要工作，是实现数据共享、数据分析和决策服务的基础。长期以来，我国各级农业经济统计数据存在采集和存储标准不统一、缺乏统一管理、难以共享等诸多问题。本研究制定了农业经济数据采集和入库的标准规范，并在此基础上，建成了覆盖 1980—2010 年的、包含 9 大类 500 余项指标的中国农业经济数据库，研发了中国农业经济数据管理系统，为实现



我国农业经济数据的集中式管理和高效利用奠定了基础。

### 2.1.1 农业经济数据规范制定

针对中国农业经济数据庞大而分散、统计口径不一致、难以共享集成等问题,面向GIS数据服务平台对数据的需求,参照相关国家标准,开展了中国农业经济数据采集标准的研究,制定了农业经济数据采集和入库的规则。对国内分县农业经济统计指标进行统一编码,制定了分县农村经济基础资料数据库中所有省、地(市)、县(区)名称统一编码,研究制定了468项县级农业经济统计指标的元数据和数据字典,为农业经济数据的规范化管理奠定了基础。

### 2.1.2 中国农业经济数据库构建

采用元数据及元数据映射技术、异构数据集成技术、数据清洗技术、大规模异构数据抽取转换与装载技术等,将各种农业经济数据经过一定的抽象、转化、建模后形成了中国农业经济数据库,涵盖了1980—2010年的省域和县域农业经济统计数据,包括自然状况、宏观经济、种植业生产、畜牧业生产、渔业生产、农业生产条件等9大类统计指标约500余项,属性数据总量达到300MB以上。该数据库的建成,实现了对农业经济数据的存储、管理和应用的集中处理,为实现不同粒度下的各种农业经济数据的整合、共享、分析与服务奠定了技术基础。

### 2.1.3 中国农业经济数据管理系统研发

深入分析不同应用级别用户对农业经济数据的需求,研究建成了面向全国、省、县(市)、乡4级农业管理用户的中国农业经济数据管理系统,实现了对各种粒度条件下农业经济数据的清洗、转换和整合入库;为了提高农业经济统计数据的直观性,采用GIS技术对农业优势产业带分布、特色农产品区域布局和农业部定点批发市场分布3大类现有数据开展了专题图制作研究,制作完成固定专题图39幅,并在此基础之上研发了自定义专题图模块,实现了任意经济统计指标的专题图自动生成;研究和开发了面向多种应用的地图展示和分析报告模板,自动生成各种报表、统计图和文字报告,通过数据的地图表达形式,提高各部门对不同应用的宏观分析和掌控能力,为政府部门快速形成分析报告提供技术工具。

## 2.2 农业经济数据分析技术研究

针对农业经济数据利用不充分,数据分析不及时,以及相应数据分析技术系统缺乏所导致的数据分析无法常态化进行的问题。本研究围绕区域粮食作物分析与优化布局、农业常态灾害与突发事件、农村居民收入差距和农产品市场价格4个内容展开研究,构建了相应的分析模型,并建立了技术系统4个,有效提高了农业经济数据的利用效率。

### 2.2.1 区域粮食作物分析与优化布局决策分析

面向农业宏观决策对区域优势产业分析的需要,提出了运用比较优势理论、模型技术、计算机技术,建立中国县域主要粮食作物生产优势产业分析软件系统的设计思想,填补了国内目前利用农业信息技术针对全国分县农产品进行比较优势分析研究的空白。针对要素信息数据不足、采集标准不统一、数据结构复杂等人工难以处理的问题,本研



究选择作物品种优化布局决策中涉及的自然条件、生产成本、物资投入、市场供需等决策要素,运用系统工程优化理论和方法,研究建立了小麦、玉米、大豆、稻谷等粮食作物的优化布局模型<sup>[8]</sup>。收集、清洗和转换了以上粮食作物的面积、品种、产量、收购价格、单位面积用工等数据,构建了各类粮食作物布局决策数据仓库,研发了区域农业产业比较优势分析与作物品种优化布局辅助决策系统,决策者可根据不同约束的投入要素,实时生成最优的品种布局方案<sup>[4]</sup>;通过决策结果灵敏度分析得到各类作物收购价格变化趋势,以及农民最终收益与各粮食作物之间的结构比例变化<sup>[9]</sup>,为定量评估决策结果与影响提供了依据;系统可根据不同数据构建新的决策模型,用于多地区的数据分析与决策。项目成果为各级农业管理决策部门提供了易用的、可定制的智能辅助决策工具,为区域农作物布局、农业生产结构优化提供了重要的辅助手段。

### 2.2.2 农业常态灾害与突发事件专题分析

针对我国日益多发的农业自然灾害和频繁发生的农业生产突发事件,本研究选取旱灾、涝灾、台风等主要灾害为研究对象,开展了农业常态灾害专题分析技术的研究。依据灾害主导因素及其相关作物占优的原则,以县级行政区域为单位,根据区域灾害条件背景(时间、空间)、灾害特征(干旱、洪涝、台风等),以及所处区域的相关作物生产情况(种植面积、产量等),采用概率统计分析方法(包括层次分析法、信息量法等),分别建立了旱灾、涝灾、台风、农业生产突发事件等主要农业灾害事件的评价分析模型5个,并能依据模型提供突发事件的灾害现状、发展趋势、逾期后果、干预措施、应急决策支持等多方面信息,实现了对农业常态灾害全方位、科学化、量化的预估分析;在灾害评价模型的基础之上,集成数据动态分析技术和专题定制技术,研究开发了农业应急灾害与突发事件专题定制分析工具,在突发灾害形成时,可快速定制生成灾区相关农业信息专题图,快速识别突发灾害所涉及的区域,提供受灾面积、受灾人口、受灾作物面积、受灾作物产量等内容,给出灾情评估,为农业管理者对灾情研判和防灾减灾措施的快速制定提供了高效、便捷的工具。

### 2.2.3 农村居民收入差距分析

针对近年来我国东、中、西部经济发展不平衡,农民收入差异持续扩大的问题,本研究运用收入差异的相关理论和绝对差异指标、相对差异指标的测算方法,对中国1997—2010年农村居民收入差异进行研究与分析<sup>[5]</sup>,提出了利用绝对收入差异和相对收入差异的全国农村居民收入差距分析模型,首次实现了全国各县域范围内的农村居民收入差距分析<sup>[10]</sup>;结合收入差距分析模型技术和数据库技术,研发出全国县级农村居民收入差异分析系统<sup>[11]</sup>,实现了全国31个省份的农村居民收入差距的快速、自定义分析,并自动生成分析报告,为农业管理者对宏观农业经济政策的制定提供了高效、便捷的工具。

### 2.2.4 农产品市场价格动态分析

近年来我国农产品价格异常波动问题时有发生,如何快速、准确地掌握农产品价格的波动、分析预测农产品价格走势已经成了摆在农产品市场管理者面前的难题。本项目面向农业部市场与经济信息司在全国30个省(市、区)所采集的农业部定点批发市场,开展农产品价格数据分析和监测研究,提出主要批发市场农产品价格动态分析方法;运

用 GIS 技术和数据库技术, 研究建立了中国农业经济市场价格分析系统, 实现了全国 12 个重点批发市场和 500 多个定点批发市场农产品价格信息的数字化管理, 并利用专题图、曲线、图表等多种形式实现了农产品价格波动的直观化展示; 同时, 面向批发市场、农产品品种和时间 3 个维度对农产品价格变化进行了分析建模, 建立了 3 种农产品价格波动分析模型, 实现了多批发市场单日单品种、单批发市场多日单品种和单批发市场单日多品种价格变化的动态分析, 并结合报告自动生成技术, 实现了分析报告的动态自动生成, 为农产品市场管理者及时掌握农产品价格波动信息提供了强有力的技术手段。

### 2.2.5 基于 Agent 的农业经济分析与群决策

针对现有农业经济信息分析与辅助决策系统普遍存在的诸如过多的人工介入、系统间不能协作、不能满足分布式计算和不能实现群决策支持等问题, 提出了应用面向 Agent 方法构造决策支持系统的思想, 设计出基于 Agent 的农业经济信息分析与辅助决策方法和技术解决方案, 将决策分析任务分解为多个独立的 Agent, 极大地简化了复杂决策的求解过程。同时将相同的知识(如预测数学模型)建立为 Agent, 用来解决不同的问题(如解决不同指标的预测问题), 极大地提高了 Agent 的重用性<sup>[12]</sup>; 构造了基于智能体的分布式群决策环境, 有效地利用了分散的计算资源, 实现了不同决策服务系统间的有效协同, 最大限度地确保决策结果的科学性; 创建了基于 Agent 的农业经济信息分析与辅助决策系统原型, 并将该系统的设计思想应用到了各农业经济数据分析的具体内容当中(见图 2)。

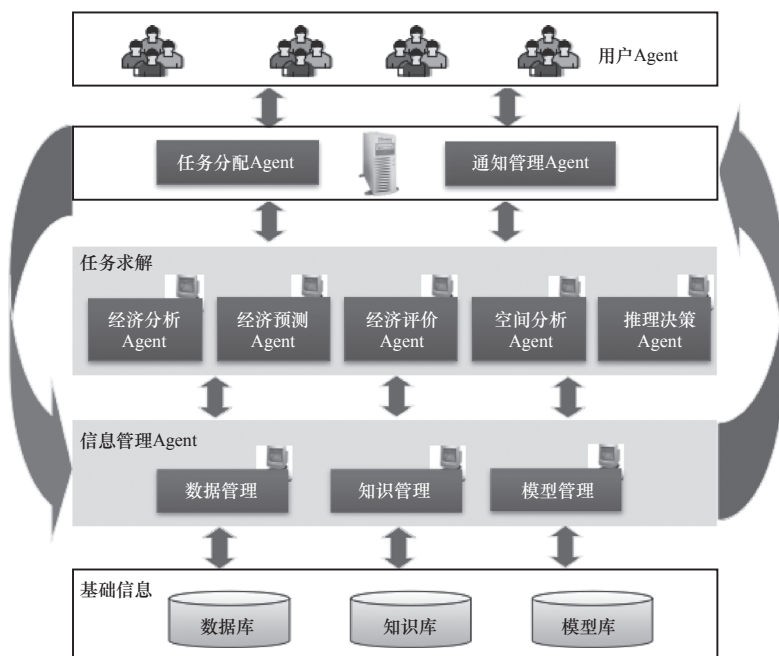


图 2 基于 Agent 的农业经济信息分析与辅助决策方法示意图

## 2.3 中国农业经济电子地图决策服务平台构建

针对现有各种类型农业经济分析服务系统存在的服务用户范围窄、服务功能分散、

服务终端单一等问题,本研究在分析各应用级别用户对农业经济数据分析服务需求的基础上,集成运用 Agent 技术、GIS 技术、数据库技术等,提出了农业生产时空信息快速处理与分析方法,改变了传统农业经济数据服务利用表格统计方式完成数据信息整理分析,在时间和准确性方面存在不确定性的情况,研建出多层次、多终端、综合型、可扩展的中国农业经济电子地图服务平台<sup>[6]</sup>。平台体系结构如图 3 所示。

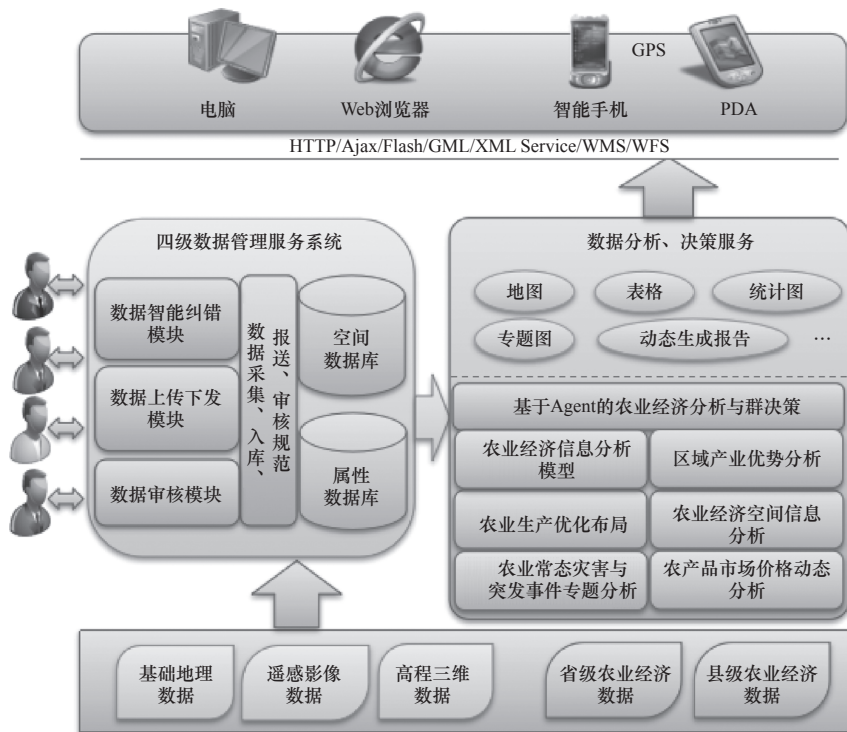


图 3 中国农业经济电子地图决策服务平台体系结构

### 2.3.1 面向全国、省、县（市）、乡的 4 级数据管理服务

面向全国、省、县（市）、乡的 4 级农业管理用户的数据上传下发、共享等管理需求,本研究设计出多层次控制的数据管理体系,实现了集数据填报—数据审核—数据查询的多层级数据管理。制定出适合电子地图服务平台使用的数据报送机制和规范,采用数据层级审核机制,实现了全国→省→县（市）→乡各级数据层层上报的规范化;研发出数据智能纠错模型,结合多年历史数据,采用初步处理、线性分析和区间调整等方法对报送的数据进行智能纠错,减少数据报送阶段人工错误率,同时,采用变化曲线和概率分析的方法对数据进行深层次的判断,对可疑数据进行确认,确保数据的真实性和可靠性;围绕农业部和各省级农业厅工作需求,提出了一种方便、快捷、直观的数据管理方法,可以对现有数据按照年份、区域、种类等不同类型进行信息查询、统计和多维显示,可实现对现有状态数据的掌握。同时按照不同部门的需求,建立不同部门的数据分析模型,通过联机分析处理和数据挖掘技术对历史数据和实时数据进行分析,并可生成相应的分析报告,帮助管理部门开展宏观决策。

### 2.3.2 面向电脑、Web、智能手机、PDA 等多元化终端的地图服务

面向电脑、Web、智能手机、PDA 等多元化的终端设备,本研究依据各类终端设备在地图服务获取和展示中的特点,设计并研发了相应的农业经济地图服务系统,极大地丰富了用户获取地图服务的手段和方法。

(1) 面向电脑的农业经济电子地图服务系统。针对个人电脑研发的农业经济地图服务单机系统,充分发挥电脑计算能力强、显示效果好的优势,将优势产业分析、应急灾害分析、农产品价格分析等分析功能运用各种专题图、Chart 图表和报告的形式直观展示,有效地提高了地图服务的质量。

(2) 基于 WebGIS 的农业经济电子地图服务系统。针对面向 Web 的电子地图服务需要,设计出基于 SOA 的中国农业经济电子地图 Web 服务架构,研究海量信息分布式管理技术,构建了基于 WebGIS 的农业电子地图服务系统,为农业部各司局及相关下属部门提供了全局性、深层次、易操作的信息分析服务。

(3) 基于 GPS 的农业经济信息空间服务系统。针对智能手机、PDA 等移动终端,集成 GPS、PDA 和 GIS 技术,采用 EVC 4.2 开发,后台数据使用 SQL CE3.1,充分利用智能手机、PDA 的强大功能处理 GPS 实时接收到的数据,再结合电子地图以实现快速定位和农业基础经济信息显示<sup>[7]</sup>;自主开发小型嵌入式 GIS 平台,实现地图数据的显示和管理;实现基于 GIS 的农业基础经济信息查询;结合 SQL CE 数据库和 ADO 技术,实现基于文字和地图的农业基础经济信息查询;结合嵌入式 GIS 和农业基础经济数据实现农业基础信息的分布图显示,有效地提高了地图服务的便捷性。

### 2.3.3 农业经济数据管理服务平台扩展接口

针对目前普遍存在的“数据鸿沟”和“数据壁垒”问题,本研究提出了一种农业经济电子地图数据服务接口方法,设计并开发出农业经济数据管理服务平台扩展接口,实现了中国农业经济电子地图服务平台的通用性,确保了在数据和功能上的可扩展性。研发出适用于农业全行业的元数据管理系统,用户可以根据具体业务,生成相应的数据字典,实现用户业务数据的导入和验证;建立了属性数据与空间要素的自动关联模型,实现了用户输入数据和地图要素之间的自动关联和验证;研发了地图服务生成模块,该模块结合平台中的数据展示、报告生成、专题图生成等服务功能,为用户生成针对具体业务数据的数据服务、地图服务和分析服务,有效解决了该平台在其他农业行业上的扩展应用问题。

## 3 平台功能

### 3.1 面向电脑的农业经济电子地图服务系统运行实例

#### 1. 数据分析功能

数据分析功能可提供按不同地区、不同年份的不同经济指标进行数据展示、图标分析、地图数据分析等多种方式相结合的数据分析服务。



## 2. 专题分析功能

专题分析功能可根据选择的不同省份、县市、经济指标等内容建立对应专题图，并提供专题数据分析服务。

## 3. 专题定制功能

专题定制功能可根据不同的灾害情况快速定制灾害专题区域分析与应急管理方案，为农业部及地方农业主管部门应对突发状况提供应急管理与灾害快速响应服务。

## 4. 分析报告自动生成功能



图4 常态灾害与突发事件分析报告

分析报告自动生成功能可根据不同业务类型需求定制功能报告模板，可根据所选内容自动生成灾害影响分析、灾害汇总分析、农产品市场价格动态分析等分析报告内容。

## 3.2 基于 WebGIS 的农业经济电子地图服务系统运行实例

### 1. 数据浏览功能

实现 WebGIS 中不同省份、县市的不同经济指标的多种数据浏览与查询。

### 2. 专题分析功能

提供网络版本的地图专题分析与专题服务功能。

## 3.3 基于 GPS 的农业经济信息空间服务系统运行实例

### 1. 地图浏览功能

实现地图加载、放大、缩小、漫游、开窗缩放、位置查询。



## 2. 信息查询

实现属性库中的属性数据查询。面向移动终端的信息查询如图 5 所示。

## 3. 地图点击查询

在地图上单击左键，即可查询鼠标所在区域的农业经济数据。鼠标点击区域的地图首先会高亮显示，然后该地方的农业经济数据会显示出来。

## 4. 数据分布图

显示查询数据的分布图或者柱状图。



图 5 面向移动终端的信息查询

# 4 技术创新

项目针对农业经济统计信息的管理缺规范、分析少技术、展示不直观的突出问题，围绕中国农业经济数据库建设、农业经济信息分析模型、区域产业优势分析、农业生产优化布局、农业经济空间信息分析、农业常态灾害与突发事件专题分析、农产品市场价格动态分析、农村居民收入差距分析、农产品市场价格动态分析、基于 Agent 的农业经济信息分析与群决策和农业经济电子地图数据服务平台构建等核心内容，开展了长期研究，取得了一系列的突破性创新成果，为发展现代农业提供了强有力的技术支撑。

(1) 在数据管理技术方面，建成了覆盖 1980—2010 年的，包含 9 大类 500 余项省域和县域农业经济指标的中国农业经济数据库。针对农业经济数据庞大而分散、统计口径不一致、难以共享集成等问题，开展中国农业经济数据采集标准研究，制定农业经济数据规范。采用元数据及元数据映射技术、异构数据集成技术、数据清洗技术、大规模异构数据抽取转换与装载技术等构建中国农业经济数据库，实现对农业经济数据存储、管理和应用的集中处理。研发中国农业经济数据管理系统，实现对各种粒度条件下农业经济数据的审核、转换和整合入库；采用 GIS 技术展开对现有农业优势产业带分布、特色农产品区域

布局和农业部定点批发市场分布 3 大类数据专题图制作研究,并研发自定义专题图模块,实现任意经济统计指标的专题图自动生成;研发面向多种应用的地图展示和自动生成各种报表、统计图和文字报告,有效提高各部门对不同应用的宏观分析和掌控能力。

(2) 在数据分析技术方面,突破了一系列的农业经济数据分析关键技术。针对要素信息不足、采集标准不统一、数据结构复杂等人工难以处理的问题,运用系统工程优化理论和方法,研究建立小麦、玉米、大豆、稻谷等作物优化布局模型,构建各类粮食作物布局决策数据仓库,研发区域农业产业比较优势分析与作物品种优化布局辅助决策系统。针对我国多发的农业自然灾害和农业生产突发事件,开展常态灾害分析技术研究,建立农业常态灾害专题分析模型,实现对常态灾害科学化、量化预估分析;集成数据动态分析技术和专题定制技术,研发应急灾害专题定制分析工具;针对我国农民收入差异持续扩大的现实背景,提出利用绝对收入差异和相对收入差异的农村居民收入差异分析模型,研发收入差异分析系统,实现全国 2 800 多个区县农村居民收入差异指标快速获取、自定义分析、自动生成分析报告;针对农产品价格异常波动问题,研究建立了中国农业经济市场价格分析系统,实现了农产品价格变化的动态监测与分析。

(3) 构建出多层次、多终端、综合型、可扩展的中国农业经济电子地图服务平台。针对农业经济信息分析与辅助决策系统存在过多人工介入、系统间不能协作、不能满足分布式计算和不能实现群决策支持等问题,研究应用面向(智能体)方法构造决策支持系统和基于 Agent 的农业经济信息分析与辅助决策方法和技术解决方案;构造基于 Agent 的分布式群决策环境;创建基于 Agent 的农业经济信息分析与辅助决策系统原型。针对农业经济分析服务系统存在的服务用户范围窄、服务功能分散、服务终端单一等问题,集成运用 Agent 技术、GIS 技术、WebGIS 技术、数据库技术等,研制出多层次、多终端、综合型、可扩展的中国农业经济电子地图服务平台,设计实现集数据填报—数据审核—数据查询的多层级控制管理体系。为确保数据真实、可靠,采用初步处理、线性分析和区间调整等方法研发出数据智能纠错模型以及变化曲线和概率分析方法对数据进行深层次判断。面向电脑、Web、PDA、智能手机等多元化的终端设备,设计出基于 SOA 的中国农业经济电子地图服务架构,开发农业经济地图服务系统,丰富用户获取地图服务的手段和方法,并将优势产业分析、应急灾害分析、农产品价格分析等功能运用专题图、Chart 图表和报告的形式直观展示。通过建立属性数据与空间要素的自动关联模型和构建地图服务生成模块,研发农业经济数据管理服务平台扩展接口。

本项目在农业经济信息规范化管理、系统化分析和直观化决策服务等方面取得的成果,广泛适用于各级农业生产、政府职能和管理部门,具有广泛的推广应用前景。成果在国内外开展了广泛的技术交流,形成的软件已在农业部各司局、全国 31 个省(市、自治区)的农业厅全面推广应用,为农业管理决策和应对突发事件提供了技术支撑和有效提高区域农业资源利用效率、优化农业生产布局的方法,为各级农业部门提供了高效、准确的信息服务,促进了农业与社会、经济、环境协调发展,对实现我国农业和农村信息化发展起到了积极的推动作用。

在数据管理技术方面,本项目有效地解决了中国农业经济数据庞大而分散、统计口

径不一致、难以共享集成等问题,研究制定的农业经济数据规范、构建的中国农业经济数据库、研发的中国农业经济数据管理系统,可广泛应用于全国各级农业统计信息、政府职能和管理部门,可长期作为我国农业经济统计信息采集的主要方法与规范,在全国全面推广和采用。

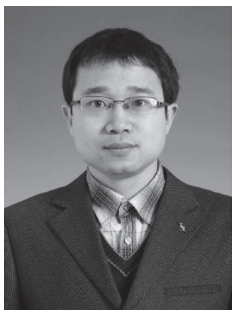
在数据分析技术方面,研发的区域农业优势产业分析、农业常态灾害与突发事件分析、农村居民收入差距分析、农产品市场价格分析、基于智能体技术的农业经济信息分析与群决策等系统,可为区域农作物布局、农业生产结构优化、农产品市场价格研判和防灾减灾措施的快速制定提供重要的辅助手段,是农业生产者和管理者易用的、可定制的智能化辅助决策工具。

在决策服务技术方面,研发的基于 Agent 的管理决策,多层次、多终端、综合型、可扩展的中国农业经济电子地图服务平台中面向电脑、PDA、智能手机等多元化终端设备、农业经济数据管理服务平台扩展接口、基于 WebGIS 的农业电子地图服务平台等应用系统,将成为我国农业信息服务领域最具效能的应用系统群,可实现农业信息智能服务的技术升级和跨越。

## 参 考 文 献

- [1] Mueller,T,N.Kitchen,D.Clay.Know Your Community:Precision Agriculture Systems[J]. Crops,Soils,Agronomy News,2013, 58(12):22.
- [2] Zeng,Z,J.Cao,Z.Gu,etal.Dynamic Monitoring of Plant Cover and Soil Erosion Using Remote Sensing,Mathematical Modeling,Computer Simulation and GIS Techniques [J]. American Journal of Plant Sciences,2013, 4(7):1466.
- [3] 诸叶平. 农业信息智能服务关键技术创新成果 [J]. 农产品市场周刊, 2013(46):8.
- [4] 范斐,杜德斌,李恒,等. 中国地级以上城市科技资源配置效率的时空格局 [J]. 地理学报, 2013, 68(10):1331-1343.
- [5] 杨福运,诸叶平,鄂越. 基于 GIS 的农业经济信息服务系统的设计与实现 [J]. 中国农学通报,2008,24(5):429-433.
- [6] 鄂越,张建兵,诸叶平,等. 基于嵌入式 GIS 的农业经济信息服务系统 [J]. 计算机工程,2008,34(23):269-271.
- [7] 洪洲. 基于 MAPX 的 MapInfo 数据空间索引的建立 [J]. 测绘与空间地理信息,2013(3):40.
- [8] 苏博,刘鲁,杨方廷.GM(1,N)灰色系统与 BP 神经网络方法的粮食产量预测比较研究 [J]. 中国农业大学学报,2006,11(4):99-104.
- [9] 鲍洪杰,刘德光. 甘肃省区域经济空间差异分析研究基于 Geoda095i 统计分析 [J]. 工业技术经济, 2011, 30(9):54-59.
- [10] 马晓熠,裴韬. 基于探索性空间数据分析方法的北京市区域经济差异 [J]. 地理科学进展, 2010, 29(12):1555-1561.
- [11] 吴玉鸣. 中国区域农业生产要素的投入产出弹性测算 [J]. 中国农村经济, 2010(6):25-37.
- [12] 谢花林. 环鄱阳湖地区农业经济空间差异分析基于探索性空间数据分析 (ESDA) 方法 [J]. 农业现代化研究, 2010, 31(3):299-303.

## 作者简介



刘升平，男，博士，副研究员，长期从事农业信息技术领域科研工作，主要研究方向包括农产品质量安全控制技术、作物模拟模型技术和农业 GIS 应用等领域。现任中国农业科学院农业信息研究所智能农业技术研究室副主任，是农业信息研究所首届杰出青年，先后主持、参与和完成国家科技支撑计划、国家“863”计划、农业部重点项目、国家自然科学基金课题等类型的科研课题 10 余项。作为主要完成人形成了小麦、玉米种植管理系统、中国农业经济电子地图、蜂产品质量追溯系统等科研成果，获得院、省部级科研奖励 9 项，公开发表 EI、ISTP、中文核心论文 10 余篇，出版专著 1 部，获发明专利和软件著作权登记 20 余项。

## 面向先进制造业的标识服务技术发展展望

田野<sup>1,2</sup> 申杰<sup>2</sup> 耿靖松<sup>2</sup> 陶源<sup>2</sup> 刘佳<sup>1</sup>

(1. 中国科学院计算机网络信息中心; 2. 广州中国科学院计算机网络信息中心)

### 摘要

发展先进制造业,是目前各国制造业应对经济全球化,提高国际竞争力的迫切需求,同时也是以信息化带动工业化、促进传统制造业结构调整和优化升级的必然选择。先进制造业的实现必须是以信息的互联互通为前提,特别是跨领域、多环节的应用之间互联互通和关联映射。但是,由于在先进制造业中各种异构标识的存在,致使各个应用环节之间形成了一个信息孤岛,且各种异构标识的长期共存是未来发展的常态。本文详细介绍了在先进制造业各领域,如原材料供应链管理、个性化定制、网络化协同、远程运维等各个方面如何构建异构兼容的、多层次、分布式、对等互通的标识服务体系架构,为先进制造业各种创新模式的发展提供参考。

### 关键词

先进制造业;标识技术;异构标识服务

### Abstract

To develop the advanced manufacture industry is the urgent needs of the economic globalization and improving the international competitiveness. Meanwhile, it is an inevitable choice to promote industrialization with information technology and the structural adjustment, optimization and upgrading of the traditional manufacture industry. The interconnection and interworking is the prerequisite to realize intelligent manufacturing, especially for the interconnection and correlation of cross-domain and multi-link applications. However, in the case of various heterogeneous identifiers coexisting, each application link becomes an information silo, furthermore, it can be predicted that different identification systems coexisting is a normality in the long term. This article describes the core technology areas of advanced manufacture industry. For example, raw material supply chain management, customization, networked cooperative, remote operation and maintenance, and so on. It is focused on establishing the heterogeneous compatible, multi-level, distributed and peer-to-peer interworking identification service system architecture so as to provide reference for various innovative models in the field of advanced manufacture industry.

### Keywords

Advanced Manufacture Industry; Identifier Technology; Heterogeneous Identification Service

## 1 引言

随着互联网、物联网技术与传统制造业的不断融合,推进先进制造业的发展是未



来制造业变革的主要动力和方向。现如今，全球制造业正面临着深刻的变革，德国提出“工业 4.0”，美国提出“先进制造伙伴计划”概念，国务院 2015 年发布的《中国制造 2025》国家战略以及近期印发的《关于深化“互联网+先进制造业”发展工业互联网的指导意见》，都无一不表明，以互联网、物联网为代表的信息技术在未来的制造业发展中起着举足轻重的作用。发展先进制造业，是各国制造业应对经济全球化，提高国际竞争力的迫切需求，同时也是以信息化带动工业化、促进传统制造业结构调整和优化升级的必然选择。

在先进制造业的各个环节中，为了实现机器、车间、企业、人之间的互联，满足机器与机器之间、物与物之间的数据交互，需要利用标识技术来对感知设备、产品、人等对象、终端、网络节点以及各类业务应用进行识别，并通过标识编码与分配、标识注册、标识查询与搜索等服务进行数据采集、映射、转换，以获取相应的地址或关联信息。先进制造业的实现必须以信息的互联互通为前提，特别是跨领域、多环节的应用之间互联互通和关联映射，而传统制造系统中，标识的种类、编码格式、标识映射关系等都较为简单，往往基于分散在不同业务系统的封闭型标识分配和查询，就可以实现有效管理。但随着先进制造业或工业互联网的应用部署，各类标识都将呈现爆发式增长，海量多源异构标识出现在同一个智能制造场景，给智能制造系统提出巨大挑战。

工业互联网是先进制造业的重要支撑，与物联网相比，工业环境中面临工业制造设备、工业控制系统、复杂网络环境、异构信息等大量复杂性设备及系统，同时，工业互联网软硬件设备由于供应商范围广泛，生产数据结构不统一，导致工厂内外及供应链上下游不互通，严重影响工业互联网的发展。未来，我国计划建立功能完善的工业互联网标识解析体系，提出了形成 20 个以上公共标识解析服务节点，标识注册量超过 30 亿的目标。采用面向先进制造业的标识服务体系，在智能制造各个环节提供异构标识解析、发现等标识服务技术，实现智能制造各个环节的互联互通将是必然趋势，标识服务体系也必将成为先进制造业的中枢神经系统和重要基础设施。

本文对标识服务体系在先进制造业的关键作用和发展趋势进行了梳理，并阐述了面向先进制造业的标识服务体系和架构，对标识服务体系在先进制造业的应用方案进行了分析，且对其未来的演进方向进行了探索。具体内容如下：首先介绍面向先进制造业的标识服务体系；然后通过智能制造典型的应用环节，如原材料供应链管理、个性化定制、网络化协同、远程运维等几个方面阐述异构标识服务支撑智能制造新模式应用；最后总结全文，展望标识服务体系的发展方向。

## 2 面向先进制造业的标识服务体系

标识服务体系是先进制造业各个应用之间互联互通的基础支撑体系，它的使用贯穿于编码、分发、注册、解析、发现等标识服务的整个过程，可以实现对象实体信息的查询、管理和控制，并以此为基础为各种先进制造业应用提供支撑服务（见图 1）。

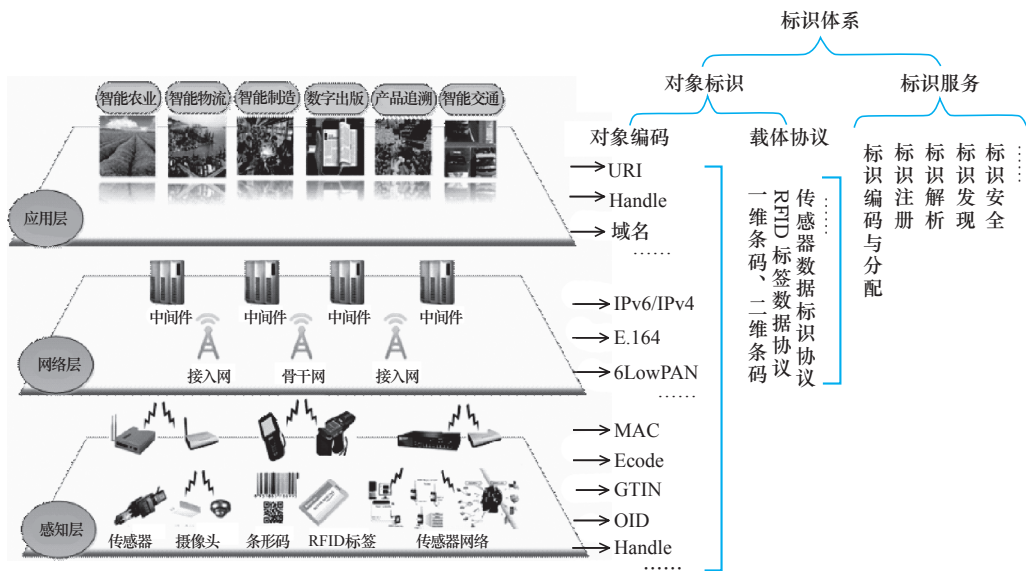


图1 标识服务体系图

随着标识技术在先进制造业的重要性日益凸显，标识体系已成为先进制造业应用规划的必要组成部分。国际上，由 GE 主导成立的 IIC（工业互联网联盟）、德国政府提出的工业 4.0，以及我国工信部牵头成立的 AII（工业互联网联盟）都将标识技术广泛用于其各类工业应用上，将标识关联到智能制造中的各个环节的核心资源，为工业制造和产品生产提供高效的定位、查询、控制和管理。目前国内外主流的标识体系包括 GS1、EPC、Handle、OID、uID、Ecode、NIOT 等，具体如下所列。

（1）GS1 标识体系：GS1 标识体系面向商品流通，主要包括标识贸易（GTIN）、物流（SSCC）、资产（GRAI）、地理位置和参与方（GLN）以及服务（GSRN），其中最为广泛的应用是商品条码贸易。在先进制造业方面，GS1 还被应用于汽车生产环节，用于汽车零配件供应链管理。

（2）EPC 标识体系：产品电子代码（Electronic Product Code, EPC）是 1996 年由美国麻省理工学院 Auto-ID 中心提出的物品编码格式，主要用于 RFID 电子标签，而 RFID 电子标签大量运用在智能制造的各个环节，也是目前先进制造业应用最广的标识体系之一。例如，欧盟的 BRIDGE 项目研究如何通过 RFID 与 EPC 网络来协助工业制造的相关操作，通过使用全球唯一的标识，提高单品信息的可追溯性。

（3）ucode 标识体系：ucode 标识体系是日本 uID 中心（ubiquitous ID center，泛在识别中心）研究并提出的，主要用于 RFID 电子标签。

（4）Handle 标识体系：Handle 标识体系最初由美国国家研究推进机构 CNRI（The Corporation for National Research Initiatives）于 1995 年提出，广泛应用到了数字图书出版领域，如 DOI 标识就是以 10 开头的 Handle 编码。在国内，Handle 标识体系被进一步推广应用到物联网各应用领域，如婴幼儿配方奶粉的溯源方面，目前也正在向先进制造业推广应用。

(5) OID 标识体系：OID（Object Identifier，对象标识）码用于识别不同数据对象，已经广泛应用于信息安全、医疗卫生、网络管理等领域。在韩国，OID 被许多工业企业所使用，例如，电力公司 KEPCO 将 OID 应用于 IoT 平台中，用于标识设备与资源，使得网关能够唯一识别所有设备，每个资源信息能够准确定位。

(6) Ecode 标识体系：Ecode 标识体系由中国物品编码中心提出，截至目前，Ecode-V0 部分 NSI 分配给 EPC 编码，Ecode-V1 部分 NSI 分配给商品条码标识、传感器节点身份标识等。在先进制造业，Ecode 标识体系正在推广应用到产品全流程追溯与管理、产品精准营销等方面。

以上这些国内外主流的标识体系被广泛应用于先进制造业，不同智能制造环节需要使用不同类型的标识体系，一个对象对应多个不同类型标识。不同国家、行业或组织存在多种异构标识编码及服务体系，实现跨领域、跨行业互联互通，避免信息孤岛的产生，成为各个标识体系之前存在的普遍问题。

为此，中国科学院计算机网络信息中心受国家发改委委托牵头建设了物联网标识管理公共服务平台，提出了 NIOT 标识体系，其核心技术路线就是在保持现有各种标识编码不变的前提下，提出一种兼容可扩展层次化的树状结构，实现对多种异构标识编码体系的兼容统一管理，与 GS1、EPC、Handle、OID、Ecode 等主流标识体系实现了异构兼容互通，核心自主知识产权的异构标识服务技术已立项 oneM2M 国际标准，并在 CCSA 完成标准制定（见图 2）。截至目前，平台建成产品追溯、建筑材料、环境监测、数据管理等多个行业子节点，标识注册量超过 30 亿，累计标识解析量超过 25 亿次，初步建立了基于自主知识产权的物联网标识管理服务技术体系，形成了既可开放共享又可自主可控的标识解析架构。

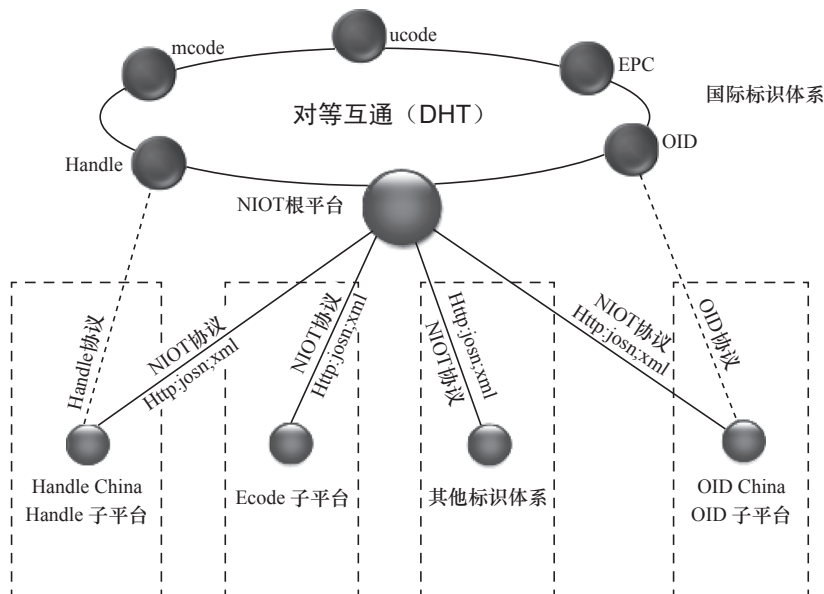


图 2 NIOT 标识体系架构图

互联网 / 物联网通过标识来识别各种设备和资源，是互联网 / 物联网支撑先进制造业各种应用最基本和最重要的环节，标识异构化的现象会随着网络技术及先进制造业应用的发展以及各国对其战略地位重视程度的加深愈演愈烈。支持多种标识体系，实现多种标识体系的互联互通，进而支撑智能制造各环节的融合发展，是先进制造业发展的必然选择。

### 3 异构标识服务支撑智能制造新模式应用

各国的智能制造正在逐步走向应用部署，标识体系作为海量异构工业数据集成与制造应用创新的重要载体，正成为新一轮产业竞争的核心。目前，异构标识服务体系已经在先进制造业完成了初步的研究和应用部署，随着各项异构标识服务技术的不断突破以及经验积累，异构标识服务体系将深入先进制造业创新模式应用领域，实现在原材料供应链管理、个性化定制、网络化协同、远程运维等方面的积极探索。

#### 3.1 原材料供应链管理

当今全球范围内的企业竞争，越来越表现为供应链之间的竞争，而且不再是单个企业之间的竞争，供应链的效率直接影响到链内所有企业的竞争力。将标识技术应用于供应链中，能够提升供应链效率，增强企业竞争力。由于标识对供应链信息传递的改善，供应链的采购、仓储、运输、生产、销售、售后服务六个环节的自动化程度、安全性、效率、效益均得到提高。

随着科学技术和物流管理的不断发展，利用高新技术提高物流供应链管理的智能化水平已成为业内人士所关注的重点。现代物流是一个包括采购、存储、生产、包装、装卸、运输、加工、配送、销售和服务活动的系统工程，特别要求信息获取与处理的快速与准确，而条形码等传统标识技术已经越来越难以胜任物流信息化的需要。不同体系的标识配合多样化的载体被越来越广泛地应用在物流信息的交换和传递之中，以此促进物流现代化发展的脚步，但不同体系的标识应用也对企业提出了异构识别解析的挑战。通过异构标识服务体系的应用，企业可以实现对不同标识体系的信息解析，从而对每一件产品实现各环节的数据采集及实时监控，对物流体系进行管理，不仅可对原材料在供应链中的流通过程进行监督和信息共享，还可对原材料在物流供应链各阶段的信息进行分析和预测。通过对原材料当前所处阶段的信息进行预测，估计出未来的趋势或意外发生的概率，从而及时采取补救措施或预警，极大地提高了企业对市场的反应能力，加快了企业的反应速度。

原材料供应链全生命周期追溯系统基于异构标识服务，分布式构建于各环节参与方，各参与方可追溯到产品全生命周期的信息，如图 3 所示。可实现企业内部信息系统之间、不同企业之间、不同环节之间信息的有效共享，促进全产业链环节互联互通。也就是说，从原材料生产开始，就对原材料绑定物联网标识，并对原材料在供应链中的过程数据信息进行异构标识解析及标准化采集，并传输到处理中心供企业和消费者查询，实现对供应链过程的实时监控，以便及时发现供应链过程中出现的问题，有效提高服务



质量及消费者的满意程度。

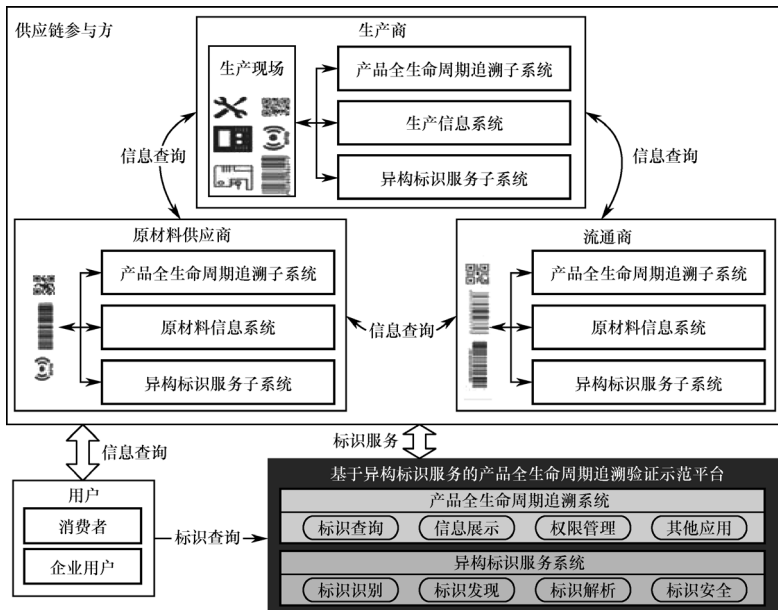


图3 原材料供应链全生命周期追溯架构图

### 3.2 个性化定制

标准化制造向个性化定制转变，也成为未来工业企业完成智能化转型的主要方向。异构标识服务体系是个性化定制多样化场景中设备进行定位与寻址并实现设备信息的采集与查询的重要技术基础，通过标识解析、发现等信息技术服务，实现海量工业领域中的设备物品相关信息的智能索引和整合，通过对工厂中的人员、机器、物料、产品、设备参数、环境参数、质量状况等进行标识化，使得所有资源所对应的信息必须要在生产系统中互联互通，以达到工业领域中生产信息的集成与共享，为企业决策者提供关键的数据支撑。

例如，运用标识服务体系将大规模制造升级为大规模定制，通过大量传感器、大数据信息化工具和机器人的协作，实现高效的定制化批量订单的生产，构建了全流程实时互联可视的互联工厂体系。将RFID作为智能库的中枢，实现个性化订单快速出入库，提高工作效率、改善盘点作业质量、增加配送中心吞吐量、有效利用仓储资源，提高物流的整体透明度。通过部署RFID与传感器配合，实现用户定制产品全流程互联可视。在物料的制定环节也可以通过二维码追溯。对于个性化定制产品，模块商按要求生产，在定制模块背面打印二维码，模块配送和验收过程通过二维码检验生产过程，即通过扫描模块二维码检验是否符合本产品定制要求，以达到装配防错和追溯的目的。

服装领域个性化定制全过程标识统一解析服务系统，可在不改变现有标识体系的情况下，通过异构标识服务技术贯穿智能改造全过程，实现信息互通、供应链互联，如图4所示。异构标识服务系统包括标识注册服务、异构识别服务、标识解析服务、标



识发现服务等，实现兼容各种异构标识，提供统一标识服务。

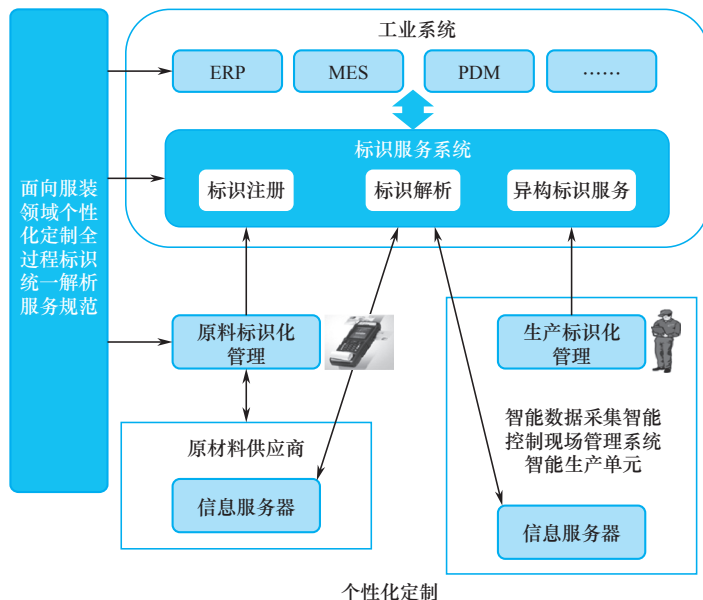


图4 产品个性化定制架构图

例如，在服装领域，可运用标识服务技术升级传统服装生产流程，构成一体化信息平台 and 以定制订单为信息流，以射频芯片为载体的全数字化运营体系。在生产过程中的人、原材料、机器的每个加工动作和行为的自动、在线、实时、全面的记录，实现了生产全流程各环节数据的自动采集、自动传输、自动处理、自动执行，实现了将正确的数据、在正确的时间发送给正确的人和机器，从而解决了个性化定制带来的生产不确定性、多样性和复杂性问题。通过个性化定制平台，让消费者可以自选面料、款式、个性配饰，且可参与设计。通过对原料各部分以及产品设计进行标识，建立关联关系。并且通过设备对于标识的识别和查询，确定各部分的裁剪风格、尺寸。基于产品标识，实现产品跟踪、定位，以及产品生产线的自动化生产信息查询。

### 3.3 网络化协同

网络化协同是通过互联网络，使整个供应链上的企业能够共享信息，让产业链各环节紧密协同，促进生产、质量控制和运营管理系统全面互联。在企业内部，为了避免制造过程中的信息孤岛，要求不同的生产元素管理之间的协同性，因此，需要各个系统之间具备兼容性。协同不仅是企业内部的协作，而且要涉及产业链上、下游组织之间的协作。通过网络协同，消费者和制造业企业共同进行产品设计与研发，满足个性化定制需求；此外，通过网络协同，配置原材料、设备等生产资源，组织动态的生产制造，满足差异化市场需求，实现在价值链上的横向产业融合。

在流程工业（如黄金矿山产业），网络化协同平台将异构标识服务技术应用到已经建成的黄金矿山产业大数据平台，基于多家矿山企业建立黄金矿山产业网络化协同的模

式，如图 5 所示。在各个系统、各个企业间基于标识技术进行生产数据交互，标识服务作为核心功能模块需要与相关工业生产系统进行网络化协同。通过构建集数据采集、数据整合、数据存储、数据分析利用于一体的大数据管理链条，把生产、设备、安全、人力资源、薪酬、物资、科技、运输、能源等各项异构标识数据管理高度集成、相互融合，实现矿山产业管理职能的优化、协同。通过云服务平台的建立，可以为矿山产业各个环节的企业建立一个沟通的桥梁，为企业提供创新设计、智能制造、供应链协同、远程维护等云应用服务，通过产业中各个行业各个环节信息的全面共享与互通，促进产业中各个企业的协同发展。

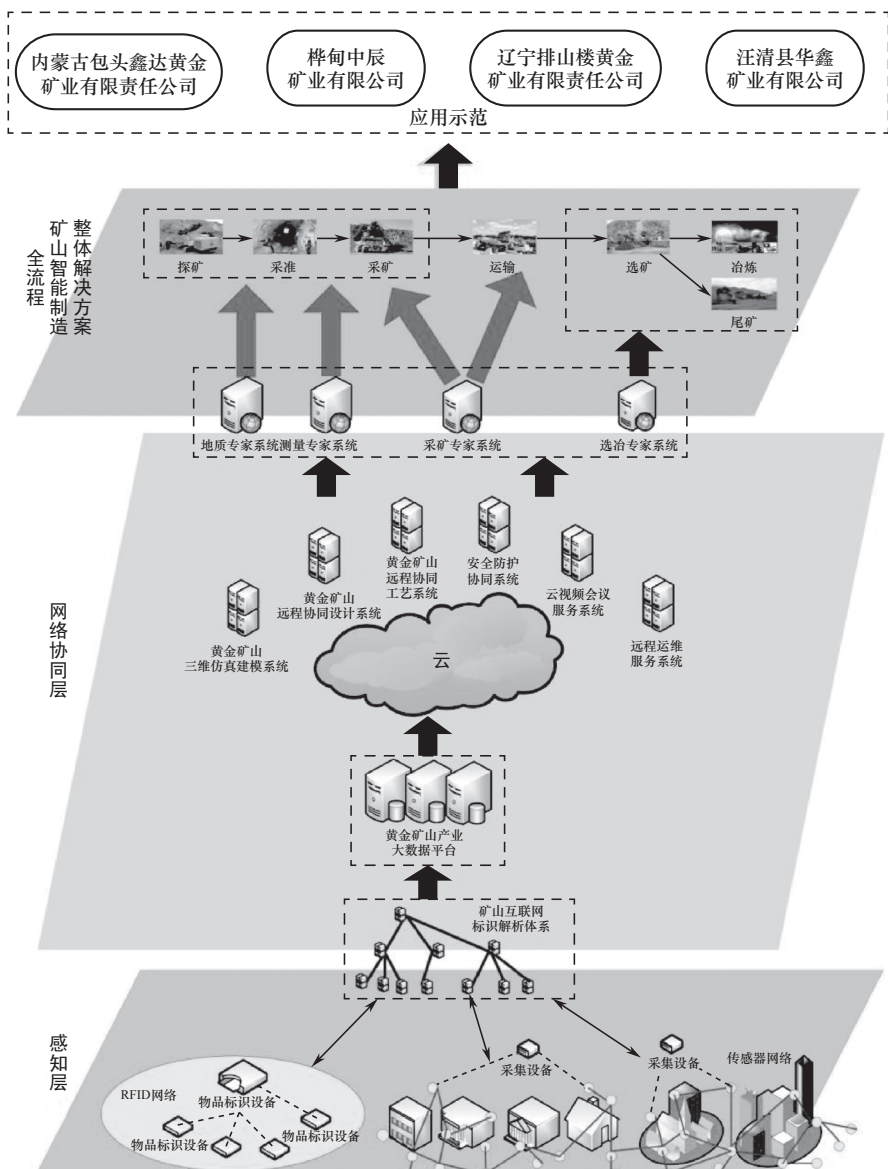


图 5 流程工业网络化协同架构图

### 3.4 远程运维

当前大部分企业在产品管理中缺少自动化的远程运维管理模式，且缺乏全面的跟踪记录，导致运维管理复杂、低效，资源浪费等问题。标识服务还可以通过大数据、云平台和移动互联网技术针对产品进行标识化管理，实现远程运维的标准化信息采集，为其提供远程运维硬件及网络的安全运行服务。远程运维平台集成标识发现服务，为授权用户提供查询服务，实现某对象标识与该标识相关的多个标识之间的映射，将标识发现服务应用于企业的运维管理，使得复杂、多样的运维管理变得简单化，高效化，并实现产品全生命周期远程运维管理，如图 6 所示。

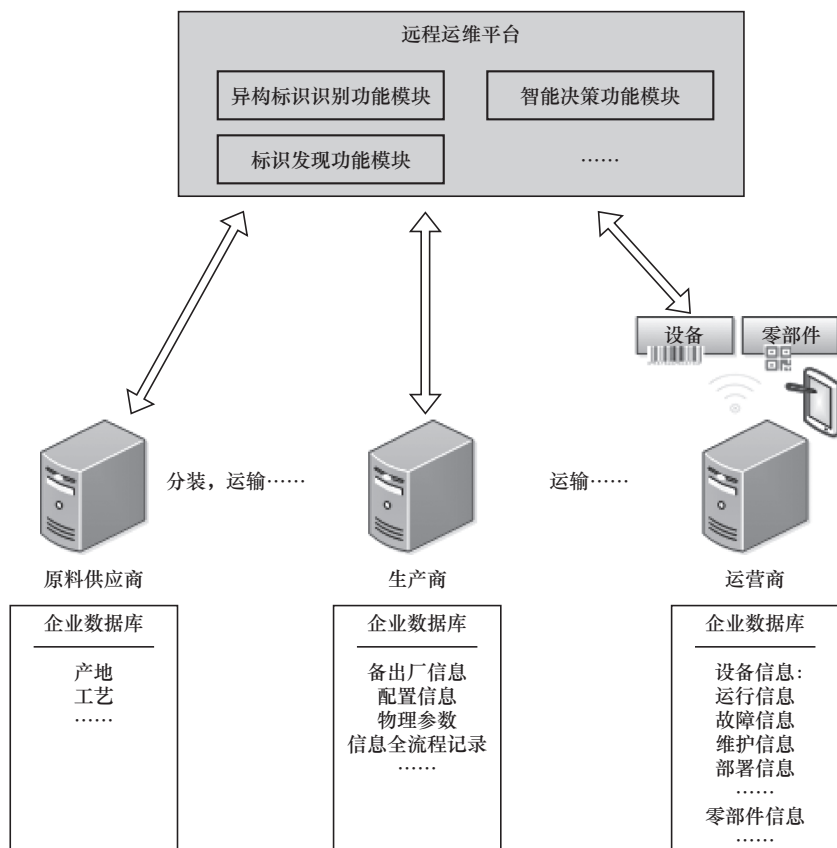


图 6 远程运维平台架构图

例如，在家电领域，原料供应商、生产商、运营商需维护和管理各自的信息服务器，基于对每个独立的家电设备及关键零部件的标识，将各个家电设备或零部件与其相关信息存储在信息服务器中。远程运维平台向各个环节参与者提供标识发现服务，以通过家电设备或零部件的标识获取全生命周期信息。异构标识识别功能模块可实现对各种标识体系的识别，标识发现功能模块维护了标识间的映射关系，通过查询标识获取其对应的所有关联信息服务器地址，标识之间的关联将不同企业、行业的数据信息进行高效

维护和管理。

此外,挖掘家用电器行业对家电设备产品管理的共性需求,围绕设备定位、设备管理、故障告警、自动派单、数据统计等关键功能,收集家电设备的各种标识化的数据信息,完成数据的高效交互。通过实际的大数据分析,形成基于异构标识服务的智能家电远程运维服务平台解决方案,以探索多场景下家电的物联网管理需求,平台采用开源方式,有良好的拓展延伸性。

## 4 总结与展望

综上所述,标识服务体系是推动制造业与互联网、物联网融合发展的重要抓手,在先进制造业中起着举足轻重的作用,同时也必将成为先进制造业的中枢神经系统和重要基础设施。但是,先进制造业应用场景中,各种异构的标识体系长期共存是未来的常态,随之而来的是异构标识给智能制造各个应用环节带来的困扰。例如,在生产现场,由于智能制造各类控制系统在协议和标识体系方面的多样性和封闭性,大量生产数据被留存在各个单独的系统中,无法充分流动和分析利用。在企业管理层,不同软件系统由于在建设时缺少统一规划,导致软件数据之间的集成互通变得异常复杂和成本高昂。这一背景下,企业之间的标识或数据互通、业务协同则更是仅在少数企业特定业务场景下有初步探索。未来,先进制造业急需统一的异构标识服务体系,为智能化构建基础性条件。因此,异构兼容的、多层次、分布式、对等互通的标识服务架构成为实现先进制造业海量资源和丰富应用之间有机衔接的核心和关键。

目前,各国家、各组织分别从自身利益出发,设计多种异构的、无法互相兼容的编码规则,同样在先进制造业也会遇到各种标识体系,如何正确地维护各类异构标识的映射关系,构建异构标识的管理和服务基础设施,是标识服务体系亟待解决的问题;另外,我国先进制造业处于起步阶段,发展基础和能力薄弱,跨行业、平台的综合性通用性标识服务体系尚未形成,亟须加强统筹协调;再者,很多新技术将以平台、软件等方式呈现,除了对于技术本身需要制定相关标准,针对标识服务体系类的标准也亟待研究和制定;同时,先进制造业的安全性需求要远大于其他传统领域,如何在开放和安全中寻找平衡,实现共同发展也是急需解决的问题。这些问题都给面向先进制造业的异构标识服务体系研究带来了挑战。

展望未来,先进制造业生态正成为产业竞争的“风口”,发展的机遇稍纵即逝。中国科学院将依托自身优势资源以及在标识服务领域的技术和经验,建立面向全球统一的异构标识服务体系,通过与 GS1、EPC、Handle、OID 等国际主流标识体系建立对等互通的标识解析服务架构,实现与国际先进制造业的标识体系兼容互通,在供应链管理、个性化定制、网络化协同、工业设备/产品运行状态远程监控及运维、全生命周期管理等各种先进制造业场景中发挥重要作用,从而促进工业转型升级过程中的工业化、信息化、智能化发展。此外,探索异构标识服务体系先进制造业应用场景中的统一管理和服

务,能够为标识服务与先进制造业应用的深度整合提供宝贵经验。

第四次工业革命浪潮风起云涌,一个崭新的智能制造时代正在走来,在万物互联的

未来新世界里,异构标识统一服务体系定将成为打造我国智能制造生态系统的坚实基础。

### 参 考 文 献

- [1] 工业互联网产业联盟 (AII). 工业互联网平台白皮书, 2017 年 9 月.
- [2] 中国科学院计算机网络信息中心, 广州中国科学院计算机网络信息中心. 物联网标识管理公共服务平台技术白皮书, 2017 年 3 月.
- [3] 物联网标识管理公共服务平台通过验收, [http://www.cnict.ac.cn/kxcb/mtsm/201703/t20170315\\_4759414.html](http://www.cnict.ac.cn/kxcb/mtsm/201703/t20170315_4759414.html).
- [4] 杨建军, 郭楠, 等. 工业物联网白皮书, 中国电子技术标准化研究院, 2017 年 9 月.
- [5] 田娟. 中国智能制造的新势力——Ecode 标识构建工业互联网生态体系 [J]. 中国自动识别技术, 2017(2): 50-52.
- [6] 2015-YDB-33 物联网异构标识服务技术要求. 中国通信标准化协会, 2017 年 5 月.
- [7] GB/T xxxx 物联网标识体系——物品编码 Ecode. 全国物品编码标准化技术委员会, 2014 年 11 月.
- [8] 中国对象标识符 (OID) 白皮书. 中国电子技术标准化研究院, 2014 年 10 月.
- [9] 吴鑫鑫. 物联网标识体系和物联网标识 ecode[J]. 厦门市标准化研究院厦门科技, 2016(2): 22-24.
- [10] Industrial Internet Analytics Framework, Industrial Internet Consortium (IIC), September 2017.
- [11] BRIDGE. Serial Level Manufacturing Control, University of Cambridge, BT, SAP, June 2009.
- [12] TP-2017-0114-KEPCO\_e-IoT\_deployment, oneM2M, May 2017.
- [13] Rfc3650 Handle System Overview, IETF, November 2003.
- [14] ITU-T X.oid-res | ISO/IEC 29168. Information technology—Open Systems Interconnection—Object Identifier Resolution System. 2009.
- [15] The EPCglobal Architecture Framework. EPCglobal, Standard Specification: Final Version 1.3, 2009.
- [16] 930-S101-1.A0.10/UID-00010-1.A0.10 Ubiquitous Code: ucode, Ubiquitous ID Center, August 2009.

### 作 者 简 介



田野, 博士, 副研究员, 研究生导师, 中国计算机学会高级会员, 中国互联网协会青年专家, CCF 大数据专委会通讯委员, 林业产业联合会流通分会专委会委员, 现任中国科学院计算机网络信息中心物联网信息技术与应用实验室常务副主任、广州中国科学院计算机网络信息中心副主任, 长期从事物联网标识相关关键技术研发及其产业化推动工作。国家发改委“物联网标识管理公共服务平台”项目执行负责人, 负责整个项目的技术架构、技术研发、平台部署和产业化应用等。已发表学术论文 30 余篇, 申请国家发明专利 30 余项, 授权专利 12 项。主要研究方向包括物联网技术与应用、工业互联网、智慧城市、下一代互联网、网络安全等。



## 面向复杂设备设施装配和维保的增强现实辅助技术

徐浩煜 韩振奇

(中国科学院上海高等研究院)

### 摘 要

增强现实技术正逐步走向实用。本文围绕该技术,首先回顾了一下它的起源。然后指出了由于AR能够实现原子世界和比特世界的融合,该技术势必能够大幅度提高人类的协作效率,具有深远的意义。接下来主要论述了AR在复杂设备设施装配和维保领域的主要技术和应用。第四部分论述了该技术对于我国科研信息化的重要作用。文章的第五部分主要谈了AR技术和当前热门技术之间的关系,指出了它们之间相辅相成的关系。文章的最后指出了AR技术的问题和展望。

### 关键词

增强现实技术;复杂设备和设施;维保;装配;协作

### Abstract

Augmented reality technology is becoming increasingly practical. This paper first introduces the origin of this technology. Then, it is pointed out that because AR can realize the integration of the atomic world and the bit world, this technology is bound to greatly improve the efficiency of human collaboration, and has far-reaching significance. Next, the main technologies and applications of AR in the assembly and maintenance of complex equipments and facilities are discussed. The fourth part discusses the important role of this technology in the research informatization in China. The fifth part of this article mainly discusses the relationship between AR technology and the current popular technologies. It demonstrates the complementary relationships among them. At the end of this paper, the problems and prospects of AR technology are described.

### Keywords

Augmented Reality Techonology; Complex Equipments and Facilities; Maintenance; Assembly; Collaboration

## 1 AR起源于复杂设备的装配和维保需求

Augmented Reality (AR) 技术并不是一个新兴概念,早在20世纪60年代末,就有科学家进行过增强现实技术的探索。更有趣的是这个词的诞生还和航空有关,是由波音的工程师创造的。

1990年,波音启动了777飞机的研制工作。由于777飞机采用了全新的航电、飞控、起落架等设计,需要在飞机上安装大量的航空线束(见图1)。这些线束对于飞机来说,好比人体的神经系统和能量传递系统,不仅提供传统的配电功能,还是各类系统的信息传输保证。线束的安装位置必须准确快速,一方面要保证各类线束之间彼此不产

生干扰，另一方面也要避免被外界的信号干扰或者干扰外界的信号。

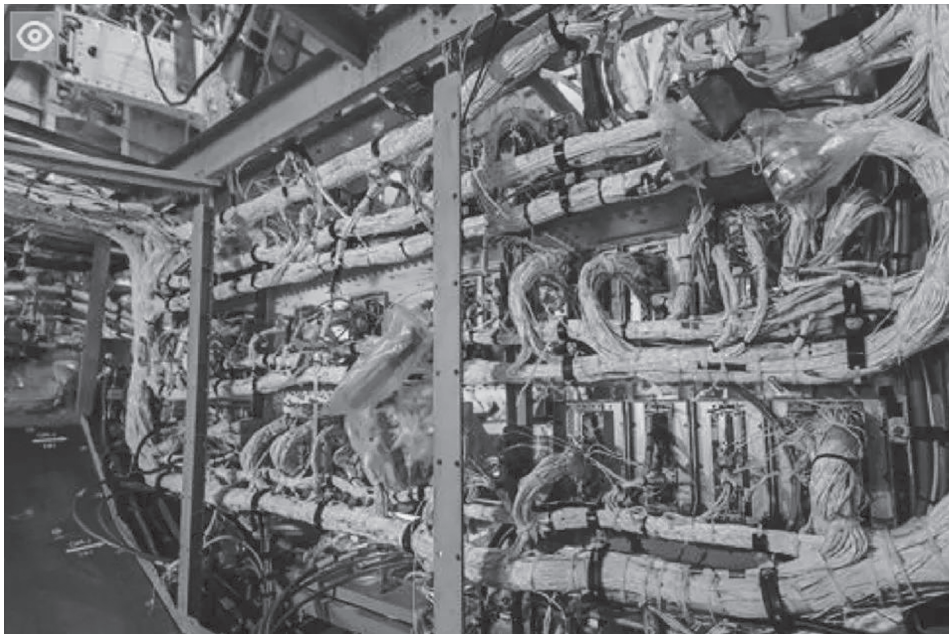


图1 飞机内部复杂的航空线束（图片来自网络）

为了安装这些复杂的线束，工作人员必须在看安装指导书的同时，进行手动绕线装配工作。这种方式不仅工作效率较低，而且安装的准确性也很难保证。

为了解决上述问题，1990年波音的两位工程师 Thomas Caudell 和 David Mizell，提出使用一种抬头透视装置<sup>[1]</sup>。它依据头部摄像头采集的场景生成数字 CAD 图，自动从完整的安装指导书提取匹配当前场景的部分，生成当前操作的安装指导虚拟图像，叠加到真实视野场景里。这样工人便可以按照透视的虚拟线路指导，进行各类布线安装。通过这个装置，轻而易举地提高了安装线束的效率，同时减少了安装线束的错误。由此他们创造了“Augmented Reality”这个英文词组，来描述在真实场景下依据用户看到的物体，自动叠加虚拟内容的技术。

要实现 AR 技术，有两项关键技术需要突破，分别是智能识别技术和跟踪注册技术。前者解决在哪里叠加虚拟物体，后者解决以何种姿态去叠加。由于配套上下游产业链尚不成熟，显示和跟踪注册等技术还不完善，最终这个设想离实用还有一段距离。但是 AR 技术已经在复杂设备的装配需求露出了萌芽。

## 2 AR 实现了原子世界和比特世界的融合，提高了人类协作效率

### 2.1 AR 能实现原子世界和比特世界的融合

人类生活着的客观世界存在着原子世界和比特世界。在数字电子设备诞生以前，只存在着一个原子世界。原子世界指的是以原子作为基本组成单位的物质世界，是我们看

得见、摸得着的实体。而在进入了数字时代以后，人类又同时有了相对于原子世界平行的比特世界。比特世界是指以比特作为基本单位的虚拟世界，它是无形的、摸不着的信息世界。

在增强现实技术成熟之前，尽管比特世界是源于原子世界的，但是同一个物体在这两个世界中的表达或者映射是互相割裂的。比如，当原子世界的一台飞机发动机出现在我们眼前时，这台发动机的三维模型、维修手册、运行数据等都以比特的形式存放在某个比特世界的空间里。这台发动机在原子世界和比特世界的表达不能以一种便捷的方式呈现在人们面前。

增强现实技术通过物体识别、三维建模、场景理解、同时定位和地图构建等关键模块，自动智能地在需要的场景下对于需要的物体进行该物体对应的比特世界表达，以合适的方式进行渲染和呈现，从而实现了原子世界和比特世界的融合（见图2）。比如，当飞机维修人员携带者增强现实设备进入机库进行起落架更换时，系统通过场景理解和物体识别知道即将进入一个更换起落架的场景。如果在更换过程中，碰到一个现场机务人员无法解决的问题，增强现实系统可以对碰到问题的部件进行三维建模后，由后台的专家或者智能机器在该部件的三维模型上进行问题标注或者流程刻画等工作，同时经过标注的三维模型也能在现场机务人员眼镜里实时呈现，辅助机务人员的维修工作，提高工作效率。而同时定位和地图构建技术，帮助系统了解机务人员所处的位置和姿态，更好地完成对于场景的理解，以便于更准确地实现虚拟物体的叠加。

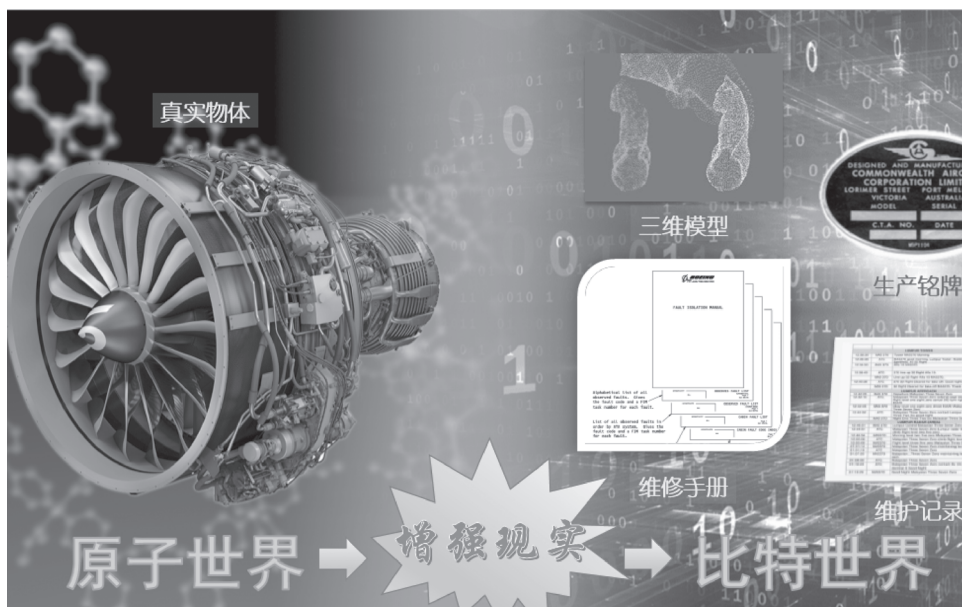


图2 AR技术实现了原子世界和比特世界的融合

由于AR能够很好地实现原子世界和比特世界的融合，因此它能够在很大程度上提高人类的协作能力和效率，并且在此基础上，进一步推进人类生产力的发展。

不同物体，小到分子，大到星球，彼此协作是各自发展的决定性因素之一。

## 2.2 生命源于协作

德国的诺贝尔奖得主，化学家曼弗雷德·艾根（Manfred Eigen）曾与维也纳大学的彼得·舒斯特两人联合就生命遗传物质的复制表现进行研究<sup>[2]</sup>。他们的研究结果表明，最终能够在生命的选择中胜出的，并不是最具适应性的 RNA 序列，而是最具适应性的准种。准种指的是一群彼此之间略有不同的亲缘 RNA 分子。RNA 复制是会产生突变的，在某个 RNA 分子产生一定的突变之后，在一个最具适应性的准种内，该分子的邻居们突变之后，有较大可能产生原始的 RNA 复制因子。因此，相邻的不同 RNA 序列就能通过突变实现相互“协作”。

在进化的过程中，集团作战且协作良好的准种，最终击败了协作不够良好的准种和单独作战的序列，取得了进化的胜利，创造了生命的曙光。

## 2.3 语言——人类走向文明的重要协作工具

语言的诞生，对于人类的重要性，完全可以和进化出第一个生命相媲美。只有最具适应性即最具协作能力的准种，经过几十亿年的进化，才诞生了生命。而人类掌握了语言这一个重要的协作工具，便能够使得人类在演化过程中战胜其他物种，并且逐渐走向文明。

语言这个协作工具是人类区别于其他物种的重要标志。人类的智力水平其实和一些高等动物相差并不大，这些稍许的智力差别并不能够把人类和其他高等动物区别开来而称为更加高级的物种。大象可以找到 40 年前去过的水源，猕猴会从一千米以外搬来石头砸坚果。但是这些动物都比不上人类聪明，这是因为人类在漫长的进化史中，通过语言实现了群体的协作、积累了大量的知识，从而能够进行更加深邃的思考，表达复杂的情感。

人类能够掌握语言，是因为人类同时具备了一些特点。比如要达到一定的智力水平、具备一定发达的语言器官，以及寿命足够长。聪明的犬类能够达到人类 8 岁儿童的智商，但是狗的发声器官比较简单，只支持简单的吼叫。与此对应的是鹦鹉的发音器官和人类很接近，但是寿命比较短，整个鹦鹉物种演化不出成体系的语言。再比如，欧洲的尼安德特人是三万年前灭绝的类人物种，他们有着比人类更大的脑容量，更强壮的身体和肌肉力量。但是当他们在欧洲碰到我们人类的祖先时，由于他们的喉结很小只能做简单的吼叫，不能形成复杂的语言。当他们面对人类侵略的时候，尽管单个个体比人类强壮，但无法彼此有效协作反抗，最终他们被人类消灭，彻底消失在历史的长河中。

## 2.4 AR 能大幅度提升人类协作的效率

RNA 准种间的协作最终演化出了生命，以语言为工具的协作使得早期人类能够在物种竞争中脱颖而出，而在现代 AR 技术的出现，将进一步提升人类协作的效率，促进人类社会的进一步演化。



如果不考虑时间的因素,语言是一维的信息表示,是一个有语音、语调、语义的序列。这种一维的信息表示,帮助人类在地球的物种竞争中胜出,走向文明。与此相对应的是,AR是多维的信息表示。因为AR实现了原子世界和比特世界的融合,而这两个世界都是至少三维以上的,这两个世界融合成的新世界会生长为一个维度远大于六维的新世界,对于人类将产生的影响是现阶段难以想象的。例如,众所周知,语言和想象力是人类区别于其他动物的两个特有功能。按照文献[3,4]这些学者的观点,想象共同体塑造了我们这个社会的形态,包括国家、民族、公司等一系列概念。人类已经通过各种文艺手段把人类丰富的想象力展现出来,如电影、小说等。但是这些想象的表现形式无法实时地展现在人们面前,而且和现实世界的画面是彼此脱节的。如果有了增强现实技术,就可以把人类的想象力实时地与原子世界无缝融合,而且可以和大量用户互动地展现在人们眼前,那时候势必对人类社会形态带来进一步深刻的变化。

### 3 AR在复杂设备设施装配和维保领域大有作为

AR技术是增强人协作能力的一种技术,它在大部分人类和机器人不擅长的领域,有着很大的用武之地。比如,前文中介绍过的飞机制造过程,大量的步骤和绕线关系,一个人很难完成全部信息的准确和完整记忆。虽然对于机器人来说,要完成这些记忆是轻而易举的事情,但是机器人现阶段技术条件下的身体的起伏和跳跃灵活度、手指的捏合情况等,也是无法完成上述工作的。

#### 3.1 AR具有广泛的适用性

因此,AR适用的场景是某项工作包含大量复杂的任务,而且这些任务本身有着严格的操作顺序和质量要求,同时任务之间也有着严格的操作顺序。常见的场景包括交通领域的交通工具,如飞机、轮船、高铁和高级汽车等,在制造过程中的线束和配件安装、维保过程中的故障检查和排故辅助等;智能制造领域的高级机床、高级工农业产品的维保;航天领域卫星、火箭等设备部件的装配;智慧海绵城市的综合管廊维保;还有一些高端装置,如传变电设备、骨干路由器、无线通信基站等,在装配和维保领域对于AR技术均有着强烈的需求。

我们再来看一下波音的例子。尽管波音在20世纪90年代在线束装配实验环境中做了一些尝试,但并没有取得实质性的进展和突破,此后的波音也没有停止在航空线束装配中应用AR技术的步伐,谷歌眼镜的诞生为AR技术在航空工业的应用创造了条件

谷歌眼镜是谷歌公司2012年推出的一款AR眼镜。谷歌眼镜在镜片的右上方配备了一个头戴式微型显示器,可以在显示器上投射需要的信息,其效果与在2.4m外的25in(635mm)高清屏幕显示效果类似。谷歌眼镜只提供了基础的硬件平台,波音为此找到应用软件开发商Skylight,共同开发满足线束装配的AR应用软件。在试验时,一名工人首先领取谷歌眼镜,通过扫描一个二维码完成设备认证;完成认证后,系统给谷歌眼镜自动推送一个线束装配应用;然后这名工人走向装配现场,再次利用眼镜上的摄像头扫描在装配现场某个部件上的二维码,该部件线束的装配指导就自动地在眼镜上显



示出来；工人便按照指导一步步地进行线束的装配（见图 3）。

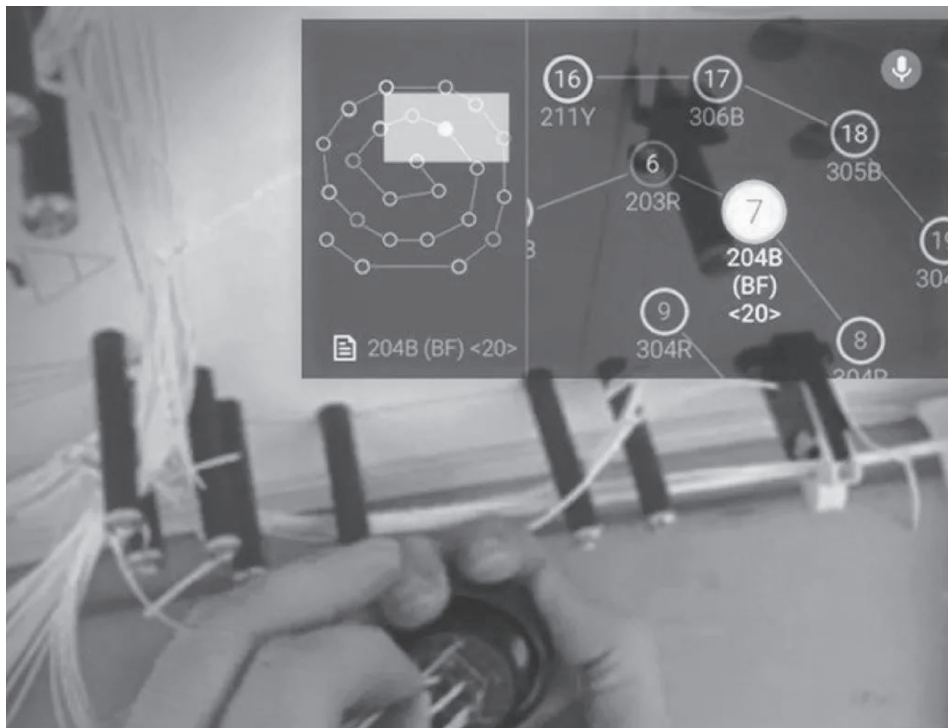


图 3 工人按照谷歌眼镜的提示进行布线（图片来自网络）

那么这个项目取得了什么效果？波音工程师 DeStories 表示，AR 眼镜帮助安装工人节省了至少 25% 的装配时间，并显著降低了错误率。

### 3.2 AR 的第一视角尤其适合远程协作

远程协助并不是一个新的应用。在电话诞生以后，远程协助的概念就应运而生了。但是只依赖电话的语音描述，把现场的情况完全描述清楚存在很大的难度。互联网诞生后几年，很快人们就开始尝试使用远程视频的方式进行彼此间的协助。相对于语音而言，视频确实能够展现出更多的内容和更丰富的细节。但拍摄视频的摄像机通常位于一个固定的地方，从而呈现给远程协作者的画面和现场工作人员所能看到的画面，在视角方面有所偏差。这种偏差在进行某些协作时，会带来很大的不便，比如某些具有精密方位要求的操作。

AR 眼镜所能提供的第一视角视频功能就尤其适合远程协作。在佩戴了 AR 智能眼镜之后，现场工作人员所看到的画面和远程的协作者是一模一样的。这就叫做第一视角。第一视角对处于协作状态的几方来说，在沟通的时候，省却了对于不同物体相对位置的澄清，从而消除了不必要的误会，既保证了结果的安全性，也提高了工作的效率。因此，这个功能深受用户的欢迎。

Skylight 基于谷歌眼镜开发了远程专家协助功能。当工人遇到无法独立解决的问题

时，利用谷歌眼镜，把拍到的现场视频实时传给其他地方的专家进行求助。由于 AR 眼镜的摄像头处于人眼附近，专家看到的画面和现场工人看到的基本一致，从而专家能给出更为精确的意见，现场工人也能快速地解决问题（见图 4）。



图 4 第一视角的远程协作

### 3.3 AR 技术具有很强的外延性

AR 技术除了在复杂设备设施领域有广泛的适用性之外，在功能方面也有很强的外延性。除了能实现复杂任务的工作步骤和质量要求提示之外，还能够实现缺陷自动检测和人机问答式排故等功能。

缺陷的自动检测现阶段主要依靠视觉传感器，比如利用可见光和红外线，来完成信号的采集。在完成了信号的采集之后，可以把信号在本地进行处理，也可以把信号传回后台服务器上进行处理。当现场工作人员佩戴者 AR 智能眼镜进入工作状态后，缺陷自动检测的程序就会自动运行。在工作人员进行每一项维保任务时，AR 系统可以对每个维保任务所涉及的相关部件进行智能检测。

受功耗、大小等条件限制，现在能够集成到 AR 眼镜中的传感器类型还比较有限。比如现在的超声波探伤仪在工业中有着广泛的用途，它能够快速、便捷、无损伤、精确地进行工件内部多种缺陷（裂纹、疏松、气孔、夹杂等）的检测、定位、评估和诊断，广泛应用在航天、航空、电力、管道、船舶制造、汽车、机械制造、钢结构、铁路交通、核能电力等行业。如果超声波探测芯片能够小型化到集成到眼镜里的水平，那么除了可见光和红外线的视觉检查之外，AR 眼镜将极大地拓展它能够检查的缺陷范围和类型。

人机问答式排故尤其适用于有一定难度的故障，但又没有复杂到需要远程专家协作的程度。通过把复杂设施设备的维保手册以及企业历史上的维修记录数字化后，进行知

识提取，建设成动态知识库。所谓动态知识库，就是指可以随时把维保中的新案例更新的知识库。在现场工作人员用自然语言提出问题，AR 系统进行语义理解之后，动态知识库自动地在知识库中寻找合适的答案，并且以文字、图像、动画乃至视频的方式，反馈给现场工作人员。

通过这种人机问答排故的方式，一方面可以促进企业重视企业内外部知识的积累、整理和挖掘，使得企业即使发生资深人士的流动，也能依旧运转如常；另一方面也可以减少对技术专家的需求，解放他们的生产力。

#### 4 AR 技术将有力地促进我国的科研信息化工作

由于 AR 技术尚未完全成熟，在我国的科研信息化过程中的作用还没有完全体现出来。但是 AR 技术实现了原子世界和比特世界的融合，从而提高了科研工作者的协作效率，将有力地推动我国的科研信息化工作。

AR 技术非常适合那些需要丰富经验而现场条件不友好的科研活动。例如，在野外考察或者考古的过程中，由于现场条件困难，富有经验的资深研究人员难免不能在现场开展工作。此时，通过 AR 技术提供的第一视角功能，位于实验室的资深专家能够以动画、标注、文字等方式给第一线的工作人员提供协助，从而加快野外科研的进程。而且由于考察和考古对于现场特殊的保护要求，有了资深专家的远程协助，对于保护现场又多了一层保障。

AR 技术还适合于需要频繁查询操作手册的复杂高端设备研制工作。例如，在航天设备的研制过程中，火箭或者卫星的装配环节众多、涉及部件数量大、对于装配的要求高。利用 AR 设备所提供的逐步指导功能，可以快速、准确地完成装配工作，减少了工作人员在一边查询手册，一边进行装配的过程中，出现错误的可能。

AR 技术对于我国大型科研装置的维保工作具有重大的意义。例如，我国的 FAST 射电望远镜、托卡马克可控核聚变装置、上海光源等，均有占地面积大、维修保养要求高等特点。维保人员在 AR 技术的帮助下，提高了对缺陷和异常的检测鲁棒性。在传感器实时监测、人工检测之外，再增加了一个技术手段来提高重大科研装置的维修保养水平。

上面仅仅举了一些简单的例子用以说明 AR 技术对于科研信息化的作用。由于 AR 技术打通了原子世界和比特世界之间的壁垒，该技术将在科研活动中得到更多、更广泛的使用，从而对我国的科研信息化起到更有力的推动作用。

#### 5 “比原”系统实现了维保效率的提高

比原系统是中国科学院上海高等研究院航空通讯技术实验室的最新研究成果。该系统将 AR 技术应用于高端复杂设备设施维护工作中，降低了维保工作对于工作人员的要求，实现了效率的提高。比原系统基于 AR 设备和 AR 服务平台，提供智能物体识别技术、位姿确定、远程指导、缺陷检测、人机交互、过程摄录等 7 大功能。

智能化物体识别功能是原子世界与比特世界之间的纽带和桥梁。AR 设备可以智能化地识别出需要装配或维保的目标物体，并会自动触发显示对应的 3D 模型或者提示信息。例如，在检查时，当 AR 设备对准需要维修的部位时，AR 设备能够自动识别该部位，并智能化提示该部位的检测要求。因此，AR 设备通过智能物体识别技术，快速区分不同种类的物体，聚焦装配或维保的物体，降低干扰，保证了装配或维保效率。

位姿确定功能为装配和维保过程提供智能操作步骤指导奠定基础。位姿确定是通过 SLAM 技术或其他定位技术来确定 AR 设备所在的位置和姿态。例如，在检查执行时，通过 SLAM 技术，AR 设备可以智能地提示当前工作位置和人员姿态，已经完成的工作位置以及待完成的工作位置；在部件维修时，AR 设备可以智能化提示第一步拆卸或安装哪种零件，第二步拆卸或安装哪种零件。

远程指导功能用于辅助解决棘手的问题。例如，在维修过程中，佩戴 AR 设备的工作人员遇到难以解决的问题时，只需要连接上远程的专家，AR 设备就可以自动传输实时画面和语音到远程专家端。专家看到画面后可以远程指导，并在画面上直接标注，并且现场的工作人员可以实时看到专家的标注信息，且该信息会叠加于真实部件上。远程指导支持的标注类型有：任意圈画、高亮显示、箭头、文字标注等。

缺陷检测功能智能地检测视野内是否存在异常，让操作人员轻松地工作。例如，在例行检查时，如果某舱门 Z 行旋钮未正确归位，当机务人员透过 AR 设备观察这扇飞机舱门时，设备上会立即弹出“Z 型手柄未正确归位”的提示，并伴随警报声。缺陷检测功可以使操作人员摆脱高度紧张带来的工作压力，让他们感受到快乐工作、轻松工作是如此简单。

比原系统依靠手势识别或语音识别完成人机交互功能。例如，当 AR 设备视野聚焦在某个应用时，操作人员只需将手指放在 AR 设备前面，食指和拇指轻轻一合，即可启动该应用。操作人员也可以使用自然语言“启动 ××× 应用”的方式，启动该应用。

过程摄录可以实现对装配或维保过程可控、可管、可追溯的智能化管理。通过 AR 设备上丰富的视觉传感器，记录整个作业过程（类似行车记录仪），为作业流程规范化、准确性等提供视频依据，并为将来的装配或维修知识库建设提供数据来源。

比原系统以其 7 大智能化的功能，彻底地将操作人员从复杂、烦琐、专业的装配和维修任务中解放出来，使得只具有初级经验的工作人员，也能按时、保质、保量地完成维保任务。

## 6 AR 和其他信息技术是相辅相成的关系

AR 技术的发展、成熟和走向商用，是和其他上下游配套技术密切相关的。本节主要论述了若干项热门技术，以及它们和 AR 的关系。

### 6.1 5G 技术

5G 技术是全球正在开发的新一代移动通信技术，它的技术目标是单终端峰值吞吐量达到 10Gb/s，端到端的延迟是 1ms。相比现在正在使用的 4G 网络，5G 网络将提供



超高容量、超低时延、大连接、高可靠性的绝佳体验。

5G 网络的高容量、超低时延和高可靠性将为 AR 应用提供无线传输保障, 进一步促进 AR 体验的完善。并能达到随时随地进行体验、分享和互动的效果。为了实现三维图像在云端的重现、实时定位和重建、高清视频检测、三维高清多媒体内容下发等功能, 按照初步测算, 对于单终端需要若干百兆乃至 Gb/s 的吞吐量。AR 的场景识别和重构、图像和手势识别等, 从动作的发生到图像在用户眼前的呈现, 其延迟不能超过 6ms。AR 移动终端的功耗与电池续航能力对网络侧的节能设计也提出了较高要求。比如功率控制和覆盖, 如果没有特殊的优化, 过多的功率消耗导致 VR/AR 终端的电力和热耗显著上升, 从而影响 AR 的使用体验。

## 6.2 人工智能

增强现实和人工智能这两大热门技术的关系非常密切, 一方面 AR 可以作为 AI 的入口, 另一方面 AI 技术的发展更加促进了 AR 设备的完善。

所谓入口, 就是人们在体验或者使用某项服务时所必须使用的工具。比如互联网时代的个人电脑和移动互联网时代的手机等。要成为入口, 必须是人们在日常生活中高频使用的工具。在即将到来的人工智能时代, 增强现实的设备也将在更多的场合被人们用到, 尤其是本文所提到的复杂设备设施的装配和维保领域。

另外, 人工智能技术也将使得 AR 技术以及 AR 设备所能提供的功能更加完善。有了 AI 技术的赋能, AR 设备才能实现物体识别。物体识别是虚拟物体叠加对象、三维建模对象等任务的基础。AR 设备的缺陷检测需要计算机视觉技术, 而人机问答式排故也需要自然语言处理中的各种技术。

## 6.3 脑机接口

脑机接口技术是指实现人的生物脑与机器互联沟通的技术。大脑的功能粗略分类, 有感知世界(如听觉视觉嗅觉等)、肢体运动(如四肢运动、眼动、说话等)以及其他更加内源性的功能(如决策、记忆、情绪等)。常见的脑机接口技术主要用于在大脑的正常功能未受影响的情况下, 使用某些装置, 来替代连接大脑和感知器、肢体链路系统的部分功能。在老年人护理、因意外丧失运动人群等方面有着广泛应用。

脑机接口技术在增强现实领域还没有得到正式应用, 但是这不妨碍我们对这两个技术的结合进行畅想。直接的用途有两个, 分别对应了读出型和写入型。读出型脑机接口技术指的是读取、解码神经信号后, 对叠加的虚拟内容进行操作, 实现人机交互, 比如虚拟内容的点击、放大、缩小、关闭、移动位置等。写入型的脑机接口技术将 AR 需要叠加的虚拟内容, 转变成信号编码写入人体的神经系统, 用于视觉方面的感知。这种情况下, 可以不再需要显示设备。

## 6.4 机器人

AR 为机器人拓展应用领域进行数据采集和案例准备工作。AR 技术的目标领域如前文所述, 应该是大部分人或者机器都不擅长的。然而, 今天的不擅长, 并不表示明天



也不行,尤其对于机器人而言。随着计算能力、存储能力、高能电池、柔性材料等技术的进步,机器人能够实现的操作势必将越来越多。

因此,人们在使用增强现实技术的时候,为未来机器人能够胜任同一份工作,应做好数据积累工作。比如,人们在进行发动机维修时,在每一步的操作流程中,将该工作人员的手指关节、手腕关节、肘关节等记录下来以后,就能够总结出在进行复杂操作时,手的运动规律和用力方向,从而为机械手的操作提供基础数据输入。

## 7 AR 的关键技术和挑战

### 7.1 跟踪和注册技术

跟踪和注册是 AR 的核心技术之一,是实现虚实融合的基础技术。跟踪指的是确定某物体在物理世界中的位置和朝向,物体可以是待叠加虚拟图像的真实物体,也可以指用户身体的某部分,如头部或者手部。注册是在跟踪的基础上,实现虚拟物体和真实物体的对准,从而完成虚实融合的目标。

为了符合 AR 眼镜的使用要求,跟踪技术必须满足移动性、轻便性和厘米级精度。因此,基于硬件的跟踪技术,比如北斗/GPS、机械式跟踪器、电磁式跟踪器、超声波跟踪器、惯性跟踪器以及光学跟踪等,均无法满足上述要求。基于视觉的跟踪技术,提供了一种非接触式的、精确的、低成本的解决方法,在 AR 眼镜领域的实用性日益增强。尤其是随着处理芯片计算能力的增强、3D 传感器成本和尺寸的大幅下降,即时定位与地图构建(SLAM)方法现在已经成了 AR 眼镜上跟踪技术的主流。SLAM 技术通常使用深度传感器(ToF 等)和双目视觉传感器采集到的 3D 数据,结合惯性传感器数据,不需要预存场景信息,在运行阶段完成场景的构建和跟踪。这个技术满足了移动性、轻便性和厘米级精度的需求,已经在诸如微软 Hololens 等产品中得到了应用。

注册的主要误差来自两个方面:第一个也是最主要的来源是跟踪误差,第二个来自显示变形。跟踪误差改善的途径有两条:一条是采用更多的传感器和更好的算法,比如使用 SLAM 等方法来减少跟踪误差;另一条是考虑渲染和跟踪误差,实现两者的联合优化,减少注册误差。因此,伴随着 SLAM 等技术的成熟和产品化,AR 技术的跟踪和注册问题基本得到了解决。

### 7.2 显示技术

AR 眼镜的显示包括了图像源和光学系统两个部分。图像源目前有 LCoS(微软 Hololens 和索尼采用)、mini-OLED(苹果可能采用)和 DLP(Oculus 采用)等。显示技术现今的焦点在光学系统部分,按照成熟度由高到低,分别是 ODG 反射式方案、光波导方案以及光场技术。

ODG 反射式方案是一种改进型的棱镜方案,采用了单片半反半透镜的技术。该方案把棱镜的其他部分去掉,只留下半反半透的膜层。通过这种方式可以轻松实现夹着膜层的玻璃片的轻薄化。这种方案的特点是成本低、技术成熟,缺点是镜片尺寸和占用空间比其他两种方案略大。光波导方案利用了光的衍射原理实现图像投射。以 Hololens 为

例，它使用了全息衍射波导光栅，这个显示技术的优点是镜片可以做到和普通镜片差不多厚度，缺点是现阶段视场较小，成本较高。MagicLeap 公司曾将光场技术推向实用化，通过改变纤维在三维空间中的形状，特别是改变纤维端口处的切线方向来控制激光射出的方向。光场技术的发展潜能很大，能够解决目前 VR/AR 领域面临的诸如 FOV 较窄和图像质量差等诸多技术难题。然而，光场技术的缺点也是显而易见的，计算量大，极难在眼镜上实现，同时要以数据同步的方式实时调整光纤维的颤动方式，从而自然改变光的输出方向，也非常难实现。

ODG 反射方案和光波导方案现在均有了商用产品，而光场技术现在还停留在概念阶段，产品的推出尚没有准确时间。

从 AR 眼镜应用可能性来看，ODG 反射式方案尽管体积较大，但对于工业级用户来说，可以接受。现阶段 AR 眼镜的显示技术也满足了大部分场景下的使用要求，但在复杂设备设施的应用领域的一些特殊工作场景，如室外空旷区域、大空间的车间等，仍有难度。

### 7.3 复杂环境适应性

目前各大公司开发的 AR 眼镜和技术，目标的工作场景集中在小空间的室内环境，而复杂设备设施的使用环境还包括室外空旷区域以及尺度达到几百米的大空间车间。

室外的工作场景，除了对电子设备提出了三防、高低温等需求之外，对于 AR 的核心技术也提出了新的挑战。比如室外工作场景的光照条件是复杂多变的，会带来逆光、反光、光照不足、阴阳光照等问题，从而对于物体识别和 SLAM 技术带来实现的困难。此外，室外条件下太阳光的红外分量对于光传感器的干扰，也需要攻克。

大空间也会对 SLAM 的工作距离提出挑战，现在的深度传感器最大的工作距离一般不超过 150m，小于机库或者车间的尺寸。另外，在机坪、机库或者车间里，由发动机等设备发出的巨大噪声，也给语音交互造成技术障碍。

因此，在复杂环境适应性方面，现有的 AR 技术需要进行进一步可行性论证和评估，乃至技术攻关。

### 7.4 实现 AR 的应用突破

待技术完全成熟有了产品之后，再去推广往往并不一定能成功。所以应该先以应用需求为牵引，在现有成熟技术的基础上，开发 AR 技术系统。只要能实现市场痛点的“单点突破”，就有机会推动应用的进一步纵向深入和横向扩展，同时也能促进技术的逐步成熟。

尚未解决的核心技术必须高度重视。虽然现在实现光场技术还有很多困难，但是随着微软以及 MagicLeap 公司在该领域的深入，相信在不久的将来，该技术有望实现产品化。由于光场技术对于人眼来说是最自然舒服的显示方式，一旦其实现产品化，势必会成为各大 AR 厂商首选的显示方案。

复杂环境下的智能识别和环境建模也是下一步要攻克的难题。复杂的光照条件，对于基于视觉的识别和 SLAM 技术是一个难题。一旦得到解决，AR 在该领域的需求前景

将十分广阔。

总之,随着芯片计算能力的提高、各种新型传感器小型化和低成本化、人工智能技术的快速发展、5G 传输技术的尽早商用、乃至脑机接口技术的成熟,AR 技术在复杂设备设施装配和维保中的应用前景将超越人们的想象。

### 参考文献

- [1] Caudell TP, Mizell DW, Augmented reality: an application of heads-up display technology to manual manufacturing processes, System Sciences, 1992. Proceedings of the Twenty-Fifth Hawaii International Conference on.
- [2] [美] 马丁·诺玛克, [美] 罗杰·海菲尔德·超级合作者 [M]. 龙志勇, 魏薇 译. 杭州: 浙江人民出版社, 2013.
- [3] [以] 尤瓦尔·赫拉利. 人类简史 [M]. 林俊宏 译. 北京: 中信出版社, 2014.
- [4] [美] 本尼迪克特·安德森. 想象的共同体 [M]. 吴叡人 译. 上海: 上海人民出版社, 2005.

### 作者简介



徐浩煜, 中国科学院上海高等研究院副研究员, 实验室主任, 发表学术论文 20 多篇, 并曾于 IEEE ICNS 2012 上获得最佳论文, 共有 6 项国内发明专利和 1 项国际发明专利, 曾获得上海市科学技术奖二等奖。目前研究方向为机器学习及其在增强现实和机器人中的应用。



韩振奇, 中国科学院上海高等研究院研究实习员, 硕士, 主要研究方向是机器学习在缺陷检测和增强现实中的应用, 发表 SCI 学术论文 1 篇, EI 论文 3 篇, 申请发明专利 5 项。

# 大数据支撑的临床肿瘤学研究

徐瑞华

(中山大学肿瘤防治中心)

## 摘要

人口健康是最重要的社会民生问题, 关乎国家经济发展和社会进步, 是各国政府着力解决的问题。我国每年新增的癌症病例多达几百万例, 且呈逐年攀升趋势。肿瘤已经成为一种常见疾病, 并且逐渐超越心血管、脑血管疾病成为我国居民死因的“头号杀手”。随着大数据和云计算技术的快速发展, 大数据在基础医学、临床医学及公共卫生领域的应用正如火如荼。本文主要介绍大数据对肿瘤学发展的重要意义, 肿瘤学大数据发展的关键技术以及肿瘤学大数据发展面临的机遇与挑战。

## 关键词

大数据; 肿瘤学

## Abstract

The health of the population is the most important social and livelihood issue. It is a matter of national economic development and social progress. There are annually millions of new cancer cases in China, and the incidence of cancer is increasing year by year. Cancer has become a common disease, and gradually transcends cardiovascular and cerebrovascular diseases as the leading cause of death in China. With the rapid development of big data and cloud computing technology, big data is in full swing in basic research, clinical medicine and public health. This paper mainly introduces the significance of big data on the development of oncology, the key big-data technology in oncology and the opportunities and challenges for the development oncological big data.

## Keywords

Big Data; Oncology

## 1 背景

大数据 (Big Data) 是指数据量庞大、数据结构复杂且依靠传统的方法和工具难以进行获取、存储、格式化、抽取、策展、整合、分析及可视化等处理的数据集。大数据的通用定义是“3V”模式定义, 其由 Gartner 提出, 指出了大数据的三个核心特征: 数据量庞大 (Vast)、数据流高速 (Velocity) 及数据类型极其丰富 (Variety)。20 世纪 70 年代的“大数据”通常是指几个或数十个 megabytes, 而今天 Terabytes 级别的数据集很常见。因此, 大数据中的“大”主要反映在某一时间点上已有的数据存储技术及计算能力所存在的不足。生命科学领域所涉及的大数据与经济、社交媒体、环境科学等领域的

大数据存在明显不同。通过对目前已发表的关于医学大数据的定义（包括 Biomedical Big Data, Big Healthcare Data 等词条），Baro, E. 等对医学大数据提出了自己的定义体系：数据量是大数据最核心的定义指标，大数据可定义为  $\text{Log}(n \times p) \geq 7$  的数据集，其主要特质是具有极大的数据多样性、极高的数据传输速度、临床及基础数据共享困难、数据复用困难、数据可靠性不稳定且难以提取有意义信息，对医疗工作各个环节和计算基数都构成挑战。这在一定程度上反映了目前学术界对于医学大数据的认识。该定义体系值得进一步商榷，但其提取的文献中对于医学大数据特征的认识与通用的大数据的概念相吻合，也具有生物医学领域的独特之处。

肿瘤是一类复杂的疾病，不同肿瘤的病因、发病机制、影响发病的因素不尽相同，肿瘤的治疗方法有手术、放疗、化疗、介入治疗、中医中药、靶向及免疫治疗等，临床上往往综合运用多种治疗方法。国际多中心随机对照临床试验（Randomized Controlled Trial, RCT）是检验肿瘤治疗方法的金标准，然而传统的 RCT 存在样本量不足及人群缺乏代表性等问题。并且，针对一些发病率低的瘤种也少有临床试验进行研究。因此，国内目前的肿瘤专科治疗主要基于国内外肿瘤治疗指南的应用和传统经验的积累，而这些传统经验及国际指南中有不少观点尚缺乏高级别的临床证据，亟须收集医学大数据并对进行分析和挖掘，从而提升肿瘤的临床诊治水平。同时，医学大数据也能为生物学家、临床医生、流行病学家及医疗卫生政策制定专家提供有效的工具，使得大数据驱动的决策制定成为可能，并最终对患者及整个人群产生有益影响。近期发表的几项有影响力的研究指出了医学大数据支撑下肿瘤学的几个重要应用方向，包括疾病的机制阐释、群体层面的疾病预防及诊疗体系的评价、个体患者的疾病诊疗决策支持及肿瘤新药新技术的研发。

## 2 大数据促进肿瘤学发展

### 2.1 大数据对阐释肿瘤发病机制、提高肿瘤预防水平的意义

正如肿瘤的发展是多步骤、多阶段的一样，肿瘤的危险因素是多方面、多层次的，其信息可隐含在病史资料、分子遗传标记、实验室检查、健康档案等信息中。传统分析肿瘤危险因素主要依靠流行病学调查，但传统流行病学调查存在样本量不足、信息不全面、随访体系不完善、调查中存在偏倚的缺陷。医学大数据技术在这些方面具有显著的优势，因而受到学术界越来越多的青睐。在肿瘤学病因的分析中，大数据的应用可以将与人体健康及疾病预防相关的多个维度的数据进行统合，其中不仅包括临床数据，也包括基因组数据、环境暴露、生活习惯、地理位置信息、社交媒体及其他多种多样的数据。基于大数据的分析，可以对人体的疾病状态和发展过程进行更相近的描绘和更为透彻的理解。

随着二代、三代测序技术的突飞猛进，人类对于基础的分子生物学规律的认识日渐加深，对于肿瘤发病机制的认识也逐步产生革命性的变化。全基因组、全外显子组、转录组、蛋白质组、DNA 甲基化、微生物组等一系列组学数据即将成为揭开肿瘤病因和发病机制神秘面纱的重要依据。这些组学数据的基本特点是数据量庞大、结构复杂、



与临床数据难以融合、分析难度大。对这些肿瘤大数据进行挖掘以产生新的知识是目前各类组学研究的重点，目前存在于公共数据平台的海量的医学大数据是进行研究创新的绝佳资源。例如，ONCOMINE (<http://www.oncomine.org>) 是一个癌症微阵列数据库和基于网络的数据挖掘平台，包含了4 700多个基因表达数据集，8万多个癌症和正常组织的样本信息，同时有完整的癌症突变谱、基因表达数据及相关临床信息。利用ONCOMINE，能够对最主要的癌症类型和各自的正常组织的差异表达进行比较和分析，可以找到潜在的致病基因，探索肿瘤的发病机制。其他重要的组学信息共享平台还包括NCBI Gene Expression Omnibus (GEO) 数据库 (<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/geo/>)、1 000 Genomes 项目 (<http://www.internationalgenome.org/>)、DNA 组件百科全书 (ENCODE) 项目 (<https://www.nature.com/articles/nature11247>) 和肿瘤基因组图谱 (TCGA) 项目 (<https://cancergenome.nih.gov/>)，等等。

目前，我国恶性肿瘤的疾病负担日益严重，得到全社会的普遍关注。肿瘤筛查是肿瘤预防的重要措施。健康体检人群可以通过大数据平台建立体检档案，使用大数据技术对健康人群筛查体检数据进行整合和分析，实时更新肿瘤风险状况，筛选出肿瘤易感人群。例如，应用大数据分析可以帮助识别罹患结直肠癌高风险的个人和家族，在患者发生疾病前提供早期检测和诊断，使其及时接受预防性的治疗、检查和随访，避免不良事件的发生，最终达到降低肿瘤发病风险的目的。

## 2.2 大数据对提升肿瘤诊断水平的意义

肿瘤的临床诊断是施行合理的治疗和改善疾病预后的先决条件，诊断的过程包括病史询问、体格检查、血液学、影像学、病理学的检验、检查等。肿瘤的早期诊断和早期治疗可以显著降低医疗卫生系统的负担，因为早期的治疗费用一般只是后期治疗费用的一半。但肿瘤的早期诊断因临床症状体征不明显，检验、检查指标敏感性不足使其变得困难。大数据可以整合大量健康人群和肿瘤患者的疾病相关信息并进行挖掘分析，在肿瘤的早期诊断中发挥着重要作用。中山大学肿瘤防治中心的研究团队从全基因组水平上对肝癌组织和正常血液 DNA 的近 50 万个 CpG 位点甲基化水平进行了比较，进而运用大数据的挖掘分析技术筛选出差异性最显著的位点，并针对这些位点对近 2 000 例肝癌和正常人血浆中提取的微量 ctDNA 进行了甲基化 PCR 扩增和测序，最后分别筛选出 10 个和 8 个位点建立了诊断模型。该诊断模型在肝癌患者和正常人中的诊断敏感性和特异性分别均明显高于现有肝癌血清标志物 AFP，对推动临床上肝癌的早诊早治具有重要意义。

肿瘤大数据的应用对现阶段我国肿瘤诊疗水平的整体提升具有重要促进作用。我国目前医疗资源分布不均，基层医疗的肿瘤诊断能力亟须提高。通过区域内多级医疗机构联合的数据中心，将海量的临床数据、影像学数据、病理学数据等医学大数据集中起来实现信息共享，再通过远程会诊等医疗手段能够帮助基层医院提升肿瘤诊治水平和诊治效率。国家卫生计生委公布的《关于推进分级诊疗试点工作的通知》(国卫医发〔2016〕45号)也强调，要“加快推进医疗卫生信息化建设，促进区域医疗资源共享。加快建设区域性医疗卫生信息平台，逐步实现电子健康档案和电子病历的连续记录以及不同级别、不同类别医疗机构之间的信息共享。利用远程医疗等信息化手段促进医疗资源纵向

流动,提高优质医疗资源可及性和医疗服务整体效率。发展基于互联网的医疗卫生服务,充分发挥互联网、大数据等信息技术手段在分级诊疗中的作用。探索设置医学影像诊断中心、医学检验实验室等独立医疗机构,实现区域资源共享。”例如,近年成立的泛中南地区肿瘤专科联盟暨肿瘤临床研究协作网络,共有来自广西、福建、云南、湖北、湖南、安徽、陕西等12个省(自治区)的50家医院加盟。该专科联盟以基层为重点,推进恶性肿瘤临床研究大数据平台建设与应用,并在联盟医院之间建设和互联远程医疗平台,开展远程会诊、教学查房、手术演示、业务培训、学术交流,体系化推进人员培训、临床指导等工作,旨在增强基层医疗机构的服务能力,推进医疗服务均质化,整体提高我国肿瘤的疾病诊疗水平。

### 2.3 大数据对促进肿瘤个体化治疗的意义

肿瘤治疗的进展很大程度上依托于国内外大型多中心随机对照临床试验的开展,但是即使在癌症治疗领域处于领先地位的美国也只有不到5%的癌症患者参与随机试验。而且这些研究纳入的是符合特定生理指标和一般状况的患者,往往不能反映肿瘤科医生日常工作中所遇到的具体情况。而基于真实世界大数据的研究(Real-World Study, RWS)则能克服该问题。医护工作者能借助肿瘤大数据系统的高效运作,分析日常诊疗相关的医疗信息大数据记录,了解数据背后蕴藏的含义,精准分析包括病人体征数据、费用数据和疗效数据在内的大型数据集,进一步明确药品的适应症,验证抗肿瘤药物在真实世界人群身上的疗效,实时地收集不良反应报告,发现罕见的不良反应,对药物进行监测和二次评估,为肿瘤患者寻找临床上最有效和最具有成本效益的治疗方法,提供更加个体化的医疗服务。

美国临床肿瘤学会(ASCO)在2013年12月开启了一个利用大数据帮助癌症治疗的项目——CancerLinQ,该项目设计的目的在于力图收集大规模的癌症患者的诊疗数据,用于辅助临床决策的制定及决策质量评估。该系统将收集医生通常在病历上记录的数据,如年龄、性别、药物和其他疾病、诊断情况、治疗一直到最终死亡。目前已经拥有87家肿瘤中心,2500余肿瘤医生,15家电子健康病历供应商,180万患者数据。该项目允许医生和研究人员进入、访问和分析匿名癌症患者的病历,几乎所有病人都会成为肿瘤学研究对象。汇集足够多的患者数据后,医生就可以利用数据库分析大量肿瘤患者的医疗数据,帮助制定其他患者的治疗方案。

肿瘤治疗已逐渐进入“精准医疗时代”。研究人员通过基因组、蛋白质组等组学技术和医学前沿技术,对于大样本特定的肿瘤人群进行生物标记物的分析与鉴定、验证与应用,从而精确寻找到疾病治疗的靶点,并对一种疾病不同状态和过程进行精确分类,最终实现对于疾病和特定患者进行个性化精准治疗的目的,提高疾病诊治效益。Fehrrmann等利用GEO数据库中约10%的数据对肿瘤组织中所有已经检测到的与DNA修复相关的基因拷贝数变异进行分析。首先是对其中的近8万份表达谱数据进行深度挖掘,构建一个包含近2万个基因的模型,研究者还进一步分析了近12万份人类肿瘤组织标本,从中确认了大量的出现拷贝数变异的位点以及在那些基因不稳定的肿瘤中反复出现的被破坏的基因。这些基因可以被用于预测肿瘤对于某些以损伤DNA为主要机制

的化疗药物的敏感性，从而有效进行患者筛选及避免过度治疗。

## 2.4 大数据对肿瘤新药研发的意义

肿瘤治疗的进展离不开各种新药的研发上市。目前，新药研发成本继续飙升，相关数据显示，在国外开发、测试一款新药并通过监管机构的批准，制药公司大概耗费 25 亿美元以上。大数据时代的到来为药物研发点燃了希望之灯。肿瘤大数据可以帮助制药公司了解目前市场上药物审批、使用等信息，促使制药公司更好地识别寻找临床药物需求的方向，同时通过使用大数据，研究人员可以挖掘真实世界中的临床数据，识别那些可能被成功开发为药物的安全、有效的潜力备选新分子，找出更有效的靶位、标记物、活性物质等并对其进行验证，也能对后续的动物实验及临床试验数据进行更加有效的筛选，从而缩短整个药物研发的时间。2015 年发表的关于靶向新药 PRAP 抑制剂 Olaparib 治疗终末期前列腺癌的研究就是一个很好的例子。该研究对 49 例晚期且存在全身广泛转移的前列腺癌患者的肿瘤组织进行基因测序，并根据与 DNA 修复相关的基因进行分型。结果显示：如其肿瘤组织存在上述基因的等位基因同源缺失和/或功能缺失性突变，88% 对 PRAP 抑制剂治疗有效。如无上述突变，有效率则仅为 6%。鉴于与 DNA 修复相关基因的重要临床意义，使用药物前需要明确人体肿瘤组织可能出现的所有类型的变异（包括位点变异和拷贝数变异）及其是否会导致基因转录、表达等相应下游改变，从而为新药明确了使用的目标人群。

另外，在新药进入临床试验的环节，大数据也能发挥其作用。医学大数据库可以通过挖掘消费者数据和生活方式分析工具加速患者招募，还能通过整合和分析肿瘤患者的信息，将患者资料与医学知识库进行对接，识别并评估两者的关联，匹配肿瘤患者与适当的新药临床试验，给临床医生提供最佳的建议。当临床试验进入数据分析环节，大数据分析能够在很大程度上提升数据价值，从临床试验中得到更多结果。总体上看，大数据对新药研发的关键价值是使试验设计更为合理，减少试验失败率，能够使临床试验更快、更有效、成本更低地推进。

## 3 肿瘤学大数据发展的关键技术

### 3.1 肿瘤学大数据规范采集与标准化技术

肿瘤学大数据的规范采集与标准化技术，旨在建立一系列标准与规范，将分散于不同信息系统中的肿瘤学临床信息通过数据采集、清洗、传输、存储、整合等流程集成于统一的大数据库中，并严格把控各环节数据质量，从而为肿瘤学大数据分析挖掘和转化应用奠定基础。

针对面向医学大数据应用的标准规范体系构建，目前国际上的研究主要集中于构建医学术语标准的本体技术以及构建信息交换规范的互操作性技术。医学本体技术通过构建受控医学词表，明确临床概念的标准用法，围绕标准用法积累表达同一概念的同义词体系，并进一步厘清不同临床概念之间的层次关系和语义关系。从归并概念同义描述的角度上讲，医学本体可视为医学大数据整合的语义标准。以欧美为代表的发达国家非常



重视医学本体系统的研发,比如,国际卫生术语标准制定组织所研发的 SNOMED-CT (Systematized Nomenclature of Medicine-Clinical Terms) 提供了一套全面统一的医学本体系统,涵盖包含疾病、所见、操作、微生物、药物等在内的 18 类临床信息。与普通的词典不同,SNOMED 所含词条不是独立和彼此无关的,而是根据本体描述逻辑原则严格组织起来的,它目前已成为当前国际上广为使用的一种临床医学术语标准。

互操作性描述的是不同信息系统之间交换、共享信息并协同工作的能力。为实现不同信息系统之间的互操作性,需要定义通用的数据结构、文档规范、传输标准、接口协议等多方面的内容,从这些角度看,互操作性技术实质上是医疗信息系统通信的语法标准。目前国际上应用最为广泛的是 HL7 卫生信息交换标准 (Health Level 7),其规范了临床医学和管理信息格式,研制了医院数据信息传输协议,汇集了不同厂商用来设计应用软件之间接口的标准格式,通过将医院信息系统数据转译至符合其标准的 XML 信息格式,以实现各种医疗卫生信息系统之间的信息共享与交换。

在标准规范的基础上,医学大数据的采集与集成依赖于一套涵盖数据 ETL (Extraction、Transform、Load) 过程的 IT 架构,即从数据源抽取所需的数据,经过标准化的数据清洗,最终按照预先定义好的数据模型,将数据加载到大数据库中,使本来异构的数据能统一起来。对于医学大数据的采集与集成体系,除了考虑数据本身的 ETL 流程外,体系对元数据的支持、数据质量的控制、维护的方便性、定制功能应用的拓展性等也必须兼顾。在通用大数据采集与集成领域,目前国际上占据主流的产品主要是 Ascential 公司的 Datastage 和 Informatica 公司的 Powercenter。而在医学大数据领域,目前最具代表性的是哈佛医学院主导建设的 I2B2 (Informatics for Integrating Biology and the Bedside) 项目,它发展了医学大数据采集与集成的完整技术架构,通过基于国际医学术语标准 (如 ICD-10、SNOMED-CT、LOINC、RxNorm 等) 对海量的临床电子病历进行结构化和标准化处理,并通过建立以患者为核心的统一星形数据模型进行临床信息的存储、整合和管理。在临床大数据库的基础上,I2B2 设计了高效的数据检索模型和友好的前端检索界面,使得医生和研究者可以非常快捷地查询不同特征组合的患者队列集合,从而为后续转化医学研究提供坚实的数据支持。

就医学大数据标准体系而言,我国在医疗信息交换标准上,组织开发了大量数据集标准,并借鉴和引用国际通用信息交换标准,水平与发达国家相比不相上下。国家卫生计生委统计信息中心组织开展了一系列国家卫生信息标准基础与技术应用研究,截至目前已研究制定了包括电子健康档案、电子病历、区域卫生信息平台、远程医疗,卫生信息数据元目录与值域代码在内的 277 项卫生信息标准,其中已正式发布行业标准 231 项,建立了我国卫生信息标准体系基本框架。在医学本体领域,国内目前参照国际医学本体 SNOMED-CT、UMLS 等,一方面构建兼容国际标准的本体库,包括医学术语标准用法、同义词、层次结构、语义标签在内的本体体系;另一方面根据中文语言的特点,构建具有中国特色的、服务于中国医疗体系的医学本体体系,为我国医学大数据的语义整合奠定了基础。目前国内已完成 LOINC 中文版、HPO (人类表型术语) 的中文版的开发,并借助各自的网站提供公开的查询服务。而在肿瘤学专科领域,国家 863 项目“常见恶性肿瘤大数据处理分析与应用研究”完成了肿瘤大数据数据/信息标准体系的构建,

建立了《肿瘤疾病电子病历基本架构与数据标准》《肿瘤疾病基本数据集》《肿瘤疾病随访 CDA 文档模板》《化疗病历信息 CDA 文档模板》《放疗病历信息 CDA 文档模板》《肿瘤疾病受控词汇表 CMV》6 项数据标准。并在以上数据标准的基础上，建立了鼻咽癌、结直肠癌等多项单病种数据标准，实现了异构数据源的整合。

### 3.2 肿瘤学大数据搜索引擎与跨库检索技术

在完成医学大数据的采集与集成后，如何从海量数据中快速、有效地获取想要的信息，正变得越来越有挑战性。除了查询效率方面的挑战，大数据搜索带来的挑战还存在于多个方面：首先，由于医学大数据涉及多种模态的数据，包括常规字符和数值型数据、文本、序列、网络（通路）和图像等，需要对不同模态的数据分别建立索引，当搜索请求涉及多模态数据时，需要综合利用多种索引信息；其次，在多模态搜索情况下，需要将不同模态数据的相关性整合起来，得到融合查询结果的相关性，以提高搜索排序的合理性；此外，为了提高检索和检索结果呈现的友好程度，除了基于表单的检索形式，还需开发交互式、可视化检索，支持用户基于数据目录，交互式、透明地浏览和探索系统中的数据，支持基于患者、疾病、通路、基因和药物等不同视图的检索与浏览；特别是，随着区域级多中心的医学大数据共享集成平台的建立，发展跨中心、跨数据库的大数据搜索引擎也日益成为领域内的重大问题。通用大数据查询分析是云计算中的核心问题之一。要打造具备良好用户体验的医学大数据搜索引擎与跨库检索，除了需要通用型大数据信息架构和技术的支撑，还需要熟悉医学大数据本身特点，并将现有大数据技术与医学大数据搜索的实际业务与需求进行紧密融合。具体而言，医学大数据搜索引擎与跨库检索涉及以下关键技术：以 HDFS、MapReduce、Hbase、Hive、Spark 等为代表的通用大数据、云计算技术；针对医学大数据业务场景的多模态医疗数据索引和联合查询技术、分布式大数据检索技术、交互式可视化检索技术、多视图检索技术以及搜索排序算法。目前，大数据领域诸多通用型技术，主要由以 Google、Apache 等为代表的国际 IT 巨头所引领，其他国家主要是学习和吸收相应技术，并将之应用于具体业务。

美国哈佛大学于 2009 年联合五家医院和研究机构启动了 SHRINE（The Shared Health Research Information Network）项目，并探索了支持医学大数据跨库检索的 IT 架构，以用于快速搜索分布于五家机构中的 600 万病人超过 10 亿条临床数据条目。SHRINE 还构建了交互式、可视化的搜索方式，使得搜索过程更为清晰、直观。此外，根据临床信息的特点，SHRINE 还优化了特定临床数据的搜索方式，如实验室检验指标，可以配置取值范围，以支持更为精准的检索。

国内多家单位都在医学大数据平台的搜索查询上做出过出色工作，且相关技术水平达到了医学大数据领域国内先进水平。中国临床肿瘤学会结直肠癌大数据中心（BACC）在建立的结直肠癌专病的数据标准与规范基础上，借助医渡云技术有限公司的数据平台标准建设流程，将分散于全国不同医院不同信息系统中的临床信息通过数据采集、清洗、存储、整合等步骤集成云端的数据中心。进而利用自然语言归一技术、结构化和 EMPI 等先进的机器学习和人工智能技术，实现了对结直肠癌的医疗数据的跨库检索，为肿瘤学大数据分析挖掘和转化应用奠定了基础。



### 3.3 肿瘤学大数据信息安全与隐私保护技术

由于包含患者个人隐私信息，医学大数据极具特殊性和敏感性，若不能妥善处理信息安全与隐私保护问题，不仅将对患者造成极大侵害，还将最终损害到整个医学大数据产业的发展。因此，在利用医学大数据的过程中，必须不断强化信息安全与隐私保护意识。2000年，美国在《健康保险携带和责任法案》（Health Insurance Portability and Accountability Act, HIPAA）中专门设立了隐私保护条款（Privacy Rule）用于保护患者的隐私信息。HIPAA法案从管理流程、物理防护、技术安全服务与机制、数据访问等角度保证了信息系统的保密性、一致性和可用性。在患者数据去身份化处理方面的要求也非常细致，该条款明确规定，临床记录必须去掉18个敏感的健康隐私信息后，才能进入产学研应用环节。

除了制度方面的保护，从技术角度提升医学大数据的信息安全与隐私保护能力也非常关键。匿名和扰动是常用的隐私数据保护技术，旨在数据发布时保护用户的隐私并同时保存更多的信息有效性。近年来，具体到医学大数据领域，目前国际上重点展开研究的隐私保护技术主要包括：基于Data Masking的医学数据脱敏技术，隐私数据泄露风险自动评估技术，非结构化医学数据的脱敏技术以及多库联合应用等复杂环境下的个体识别风险评估与预警技术。信息安全技术是一个非常庞大的技术体系，它主要包括物理安全策略、信息加密策略、访问控制策略、防火墙控制策略和网络安全管理策略等方面的内容，旨在保障数据在存储、传输、交换和使用过程中的安全性、保密性、完整性和真实性。在数据存储加密技术方面，随着云计算时代的到来，随之而兴起的主流技术包括混合加密、同态加密、基于BLS短签名POR模型、DPDP、Knox等技术。在数据访问控制技术方面，现在的主要技术有时空融合的角色访问控制、基于属性级加密访问控制、基于层次式属性级的访问控制等。具体到医学大数据领域的信息安全应用上，目前主要涉及的技术有：以数据安全为目标的医学数据分类分级管理及安全防护策略、数据应用的认证授权与访问控制技术、分布式环境下的医学数据加解密技术与访问审计技术、非法数据访问行为的检测与阻断技术以及健康医学大数据真实性和完整性保障技术等。通过制度、技术、管理的三位一体，在医疗数据的存储、访问、应用等所有环节形成系统性保护，才能建立起医学大数据领域完整的信息安全与隐私保护体系，这也是未来医学大数据信息安全与隐私保护技术的发展趋势。

与发达国家相比，尽管我国的信息安全产业还处于起步阶段，相关的隐私保护制度尚不完善，但随着大数据时代信息安全意识和隐私意识的唤醒，以及国家对数据安全的日益重视，我国信息安全产业必然会越发壮大。目前国内多家单位在医学大数据信息安全和隐私保护领域具有深厚的积累。国内的众多高校，在网络攻防、演化密码、可信计算、信息安全等领域具有强大的优势，承担并完成了一批国防预研、国家安全重大基础研究、省部级等重要科研课题，参加制定了我国国家和军队的可信计算相关技术标准，在国内外权威期刊和重要学术会议上发表了一系列高水平论文，研究开发了一系列高科技安全产品，其中部分产品成功转换为国防型号项目，并应用于信息实战中，在科学研究、国民经济建设和国防信息化安全建设中发挥着重要作用，能够从技术层面上保障医

学大数据平台的信息安全。如能充分发挥我国各研究机构的既有研究优势,结合医学大数据的特点及医疗机构的具体情况,在医学大数据信息安全与隐私保护技术上开展协同研发,可以保证医学大数据信息安全与隐私保护达到国际先进水平。

### 3.4 肿瘤学临床数据与组学数据融合分析技术

随着高通量测序技术的不断发展和组学数据的日益积累,肿瘤学临床数据和组学数据的融合本身已成为不可阻挡的趋势之一。以规模化的人群队列为基础,以肿瘤学临床大数据和组学大数据为基石,根据病种的研究需要整合基因组、转录组、蛋白组、免疫组、代谢组及表型组等多层次信息,抽提疾病的组学特征谱,并寻找组学特征谱与疾病早期筛查、分类分型、疗效评价、预后评估等临床应用之间的关系,从而为肿瘤患者的精准诊断和精准治疗提供依据,目前已成为肿瘤学大数据领域和转化医学研究的前沿热点。美国德州大学安德森癌症中心于2012年启动了名为“APOLLO”(Adaptive Patient-Oriented Longitudinal Learning and Optimization)的项目,旨在持续跟踪癌症患者,并动态收集治疗前、治疗中和治疗后的肿瘤组学数据和临床诊疗数据,以期揭示疾病发生、发展过程中的内在规律。安德森癌症中心还进一步同美国国际商用机器公司(IBM)合作,共同训练研发医学人工智能沃森(Watson),沃森通过吸收来自安德森癌症中心关于肿瘤治疗60多万条医疗证据以及肿瘤学领域300多份医学期刊、200余种教科书以及近1500万页文字,从而训练出了IBM Watson肿瘤解决方案(IBM Watson for Oncology),可基于病人的组学数据和临床数据辅助医生为病人提供更好的个性化肿瘤治疗方案,并就药物选择及用药方案方面提供建议。综合国际进展来看,临床数据与组学数据的融合分析技术,是深入解析疾病表型分子机制、通往精准医学临床应用的关键技术,因此是医学大数据应用技术体系不可或缺的重要组成部分。

受益于我国自然科学的高速发展,在对临床数据与组学数据整合分析方面,我国科学家已能紧跟国际先进水平,并已在医学大数据分析挖掘领域取得重大研究成果。在入选2011年度中国十大科学进展的“发现人肝癌预后判断和治疗新靶标”这一研究中,通过深度测序技术进行人正常肝脏、病毒性肝炎肝脏、肝硬化肝脏和人肝癌小RNA组学分析,发现了miR-199表达高低与肝癌患者预后密切相关,证明miR-199能靶向抑制促肝癌激酶分子PAK4而显著抑制肝癌生长,从而为肝癌的预后判断与生物治疗提供了新的潜在靶标。该工作面向我国重大疾病防治需求和医学界目前普遍重视的转化医学研究,是集基础研究、生物技术、临床标本管理和病人资料分析等多家单位和学科交叉合作的成果,为后期进一步研究小RNA在肝脏生理和肝脏疾病中的作用奠定了基础。这一研究是临床数据和组学数据融合分析的典型案例。

### 3.5 临床数据表型组构建技术

基于从临床病历文档等非结构化文本中抽提出结构化的表型组信息,如体征、症状、检验、诊断、手术、药物等信息,可以展开复杂疾病分型、相似患者搜索、治疗方案推荐等研究。因此,表型组构建技术对于医学大数据的分析挖掘和转化应用非常关键。依据表型信息抽提方法学的不同,目前国际上常用的表型组构建技术可分为三

种：基于本体（Ontology-based）、基于规则（Rule-based）和基于机器学习（Machine learning-based）。其中，基于本体的表型组构建技术主要通过本体的描述表识别临床文本中的医学概念及其语义类型，然后通过本体的关系表寻找概念关联的属性，该技术非常受制于本体的描述能力，而完善的本体构建又是一项非常复杂需要不断迭代的工程，因此很少单独使用。基于规则的表型组构建技术则是运用自然语言处理技术，将文本抽象表征为名词、形容词、数量词等词性，然后尝试发现待抽提的表型信息及其关联属性的描述规则，在验证这一规则后将之用于海量文本的信息抽提。基于规则的表型组构建技术的优点是具有较高的准确度，但由于临床文本的复杂性，表型信息抽提规则的制定与维护都需要投入大量的人力与时间，因此不太适用于表型组规模较大的应用场景。基于机器学习的表型组构建技术，则通过将专家标注语料作为训练集，学习出医学命名实体、实体关系识别、实体属性抽提等表型信息抽提相关的机器模型，这种表型组构建技术具有耗费人力少、构建效率高等特点，并且相对于其他两种方法，整个机器学习流程容易从一种疾病迁移到另一种疾病大数据的研究上，因而成为目前领域研究的热点。

尽管基于机器学习的表型组构建技术逐渐成为主流，但传统机器学习技术在医学大数据的应用中依然存在着诸多限制。首先，机器学习模型的构建极度依赖于专家标注的高质量语料集，而高质量语料集的获取成本非常高，如何充分利用海量未标注数据即原始数据自动学习表型信息模式以减少专家投入是一个非常重要的问题；其次，特征的选取对机器学习模型效果和泛化能力影响巨大，传统的特征选取依赖于专家经验与知识，有效特征的选取费时费力；最后，机器学习的训练速度和文本处理速度并不高，极大地限制了其处理海量医学大数据的能力。这三大问题都直接指向了医学大数据时代的表型组构建技术的“通量”问题，即如何发展更为高效、快速、准确的机器学习模型。这也引出了基于机器学习的表型组构建技术的新的发展方向，即基于主动学习（Active Learning）或自我学习（Self-Taught Learning）的高通量表型组构建技术（High-Throughput Phenotyping Algorithm）。尤其是近年来深度学习技术的发展及其与大数据、云计算技术的不断融合，更是强化了这一趋势。通过深度学习，利用少量的标记语料作为种子，再从海量的数据中自动学习出有效的特征，并基于云计算或分布式计算架构进行快速的文本特征描述和机器模型学习，然后构建专家交互系统，结合反馈不断迭代优化，从而使得表型组抽提模型越来越完善。

从当前医学大数据表型组构建技术的前沿态势来看，机器学习和自然语言处理是两大关键性的支撑技术。在医学自然语言处理领域，欧美等国家在学术研究上非常活跃，并业已形成诸多成熟、实用的医学自然语言处理框架或工具。例如，斯坦福大学发展的命名实体识别工具 Named Entity Recognizer，Apache 开发的用于临床的文本分析和知识提取的 cTakes 系统，德克萨斯大学开发的用于药物信息抽提的 MedEX 系统，等等。

与之相比，尽管中文自然语言处理具有分词、词性、句法等基本分析工具，但由于临床文本术语和语法的特殊性以及汉语言的复杂性，通用自然语言处理工具在医学领域内表现往往不佳，这极大地制约了表型组构建技术的发展。但目前国内已有众多研究机构长期以来致力于利用自然语言处理技术和知识表达技术，具有对电子病历等非结构化文本进行医学数据分析、建模与挖掘实践，在医学信息学领域具有良好积累。例如，国



家肿瘤大数据中心对大量的病历文本进行了临床术语应用、高通量表型组构建的初步探索,为肺癌、胃癌、肝癌、食管癌、结直肠癌、前列腺癌、乳腺癌等疾病构建症状、体征、用药及临床预后等表型的提取算法,为上述肿瘤的分子分型、新的分子标记物筛选等提供表型数据支持,并初步探索 PheWAS (全表型组相关性分析)。临床数据表型组构建及分析技术路线图如图 1 所示。

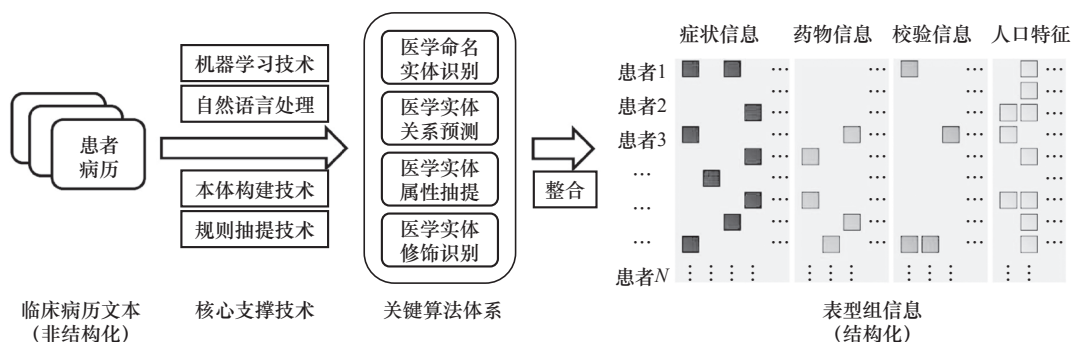


图 1 临床数据表型组构建及分析技术路线图

## 4 肿瘤学大数据平台的发展

### 4.1 肿瘤学大数据平台的框架建设

#### 4.1.1 肿瘤大数据管理系统

对肿瘤大数据平台的各项数据进行统一管理,通过用户和权限管理灵活设定不同区域、不同级别、不同应用范围的用户对数据的访问权限,保证每个使用者在自己的数据权限内使用数据。系统存储的肿瘤数据标准作为数据目录说明书,可供使用者快速检索、查阅和了解系统中存在的数据存放的位置,达到对数据的正确使用目的。数据综合查询功能在传统的结构化数据查询的基础上,引入大文本全文索引技术,对传统的结构化字段和大文本非结构化字段进行联合查询,该项功能采用大数据在线分析技术,让科研工作者能够快速了解并探索数据。

#### 4.1.2 肿瘤大数据分析系统

肿瘤大数据分析系统贯穿数据探索、数据统计、数据挖掘的应用主线,整合了医学统计学的常用方法,为科研工作提供全方位支撑。通过使用肿瘤大数据分析系统,科研工作者可以摆脱传统数据分析工作中占据大量时间的数据准备环节,也不需要把数据导出后再去使用 SAS/SPSS 等专业应用,所有的工作都可以在线完成。

#### 4.1.3 单病种科研管理系统

单病种科研管理系统从业务条线的角度,从收集科研数据、填写 CRF 表单,到后面的患者 360 视图展现、统计和多维分析,给单病种科研工作者提供了有力的支撑。系统以瘤种或专科为单位,建立了多个单病种库,每个系统根据研究者指定的入库规则去

累计病例，提供给医生进行科研目的的访问和调用。

4.1.4 健康与疾病风险评估系统

健康与疾病风险评估系统是从癌病防治的角度对健康和疾病风险进行研究，可以从历史的防癌体检数据中，关联患者最终是否患癌的结果，并挖掘和提炼之间的内在联系，找出防癌体检指标中关键因子，为及早识别疾病风险提供决策依据支持。同时，还根据既往的科研结果，将风险评估模型嵌入系统，自动对每一位体检患者进行患病风险评估及提供防癌建议。

4.1.5 肿瘤卫生经济学研究系统

肿瘤卫生经济学研究应用是基于对花费相似的病例进行分组，为医保付费及医疗绩效评价提供参考。目前通用版本的 cn-DRGs 分组结果，对于肿瘤疾病的参考效果并不十分理想，对肿瘤病人的费用相关性更高的是病人的 TNM 分期等表示疾病严重程度的变量，而这些变量在通用版的 cn-DRGs 分组模型中并未纳入，因此有优化的必要。肿瘤大数据平台的分析与应用系统框架如图 2 所示。

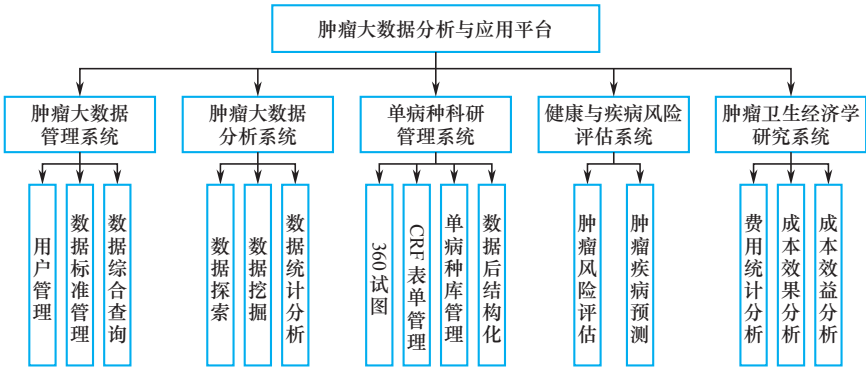


图 2 肿瘤大数据平台的分析与应用系统框架

4.2 跨区域肿瘤学大数据平台的搭建

4.2.1 建立数据 / 信息标准体系

通过整合医院各系统临床数据，并经过模型重构、数据清洗、数据标准化、结构化、归一等处理，建立基于完整数据源的患者诊疗模型。患者诊疗模型全面覆盖医院各个生产系统，且具有可扩展性，如根据肿瘤医院国内领先的放疗系统设计针对需要放疗患者的扩展模型。在患者诊疗模型之上，根据国际 ICD10 标准，HL7CDA 标准及卫生部电子病历标准，临床专科特异标准，如 NCCN 指南、AJCC 指南等，联合肿瘤专家共同制定。

在此基础上，根据不同瘤种的临床诊疗特性，进一步制定单病种专科瘤种数据集（见图 3）。临床肿瘤学的研究可以利用专科数据集进行大数据的相关分析并解答相关问题。将建立的数据 / 信息标准体系作为不同区域医院之间的数据转换的标准，可实现异构数据源的整合。



结直肠癌专科数据字典						
人口学信息	就诊记录	主诉	现病史	既往史	个人史	家族史
■ 姓名 ■ 性别 ■ 年龄 ■ 民族 ■ ABO血型 ■ Rh血型 ■ ...	■ 入院时间 ■ 出院时间 ■ 入院科室 ■ 出院科室 ■ ...	■ 着发症状 ■ 病程 ■ 梗阻类型 ■ 确诊方式 ■ 原发灶部位 ■ 体重改变 ■ ...		■ 疾病史 ■ 手术史 ■ 外伤史 ■ 过敏史 ■ ...	■ 吸烟年数 ■ 吸烟量 ■ 戒烟年数 ■ 饮酒年数 ■ 饮酒量 ■ 戒酒年数 ■ ...	■ 肿瘤家族史 ■ 亲属关系 ■ ...
体格检查	专科检查	诊断	实验室检查	影像学检查	内镜检查	
■ ECOG评分 ■ KPS评分 ■ 体表面积 ■ 浅表淋巴结肿大 ■ ...	■ 直肠指检 ■ 肿物大小 ■ 肿物下缘 ■ ...	■ 临床诊断 ■ 影像学诊断 ■ 病理诊断 ■ ...	■ 肝功能 ■ CA199 ■ CA125 ■ CEA ■ 粪便潜血 ■ ...	■ 腹部CT ■ 消化道造影 ■ 腹部MRI ■ PET-CT ■ ...	■ 普通结肠镜 ■ 超声肠镜 ■ 胃镜 ■ ...	
病理检查	基因检测	手术及操作	化学治疗	靶向治疗	放射治疗	
■ 组织学病理 ■ 冰冻病理 ■ 分子病理 ■ 病理分型 ■ 分化程度 ■ ...	■ MSI ■ BRAF ■ NRAS ■ KRAS ■ ...	■ 手术名称 ■ 手术时间 ■ 手术入路 ■ 手术部位 ■ ...	■ 药物名称 ■ 给药剂量 ■ 给药途径 ■ 给药频率 ■ 治疗周期 ■ ...		■ 放疗区域 ■ 放疗方式 ■ 分割次数 ■ ...	
介入治疗	免疫治疗	治疗评价	不良事件	随访信息	其他	
■ 介入名称 ■ 介入操作时间 ■ 引导介质 ■ 栓塞剂 ■ ...	■ 免疫治疗方案 ■ CIK、DC-T ■ 治疗周期 ■ 治疗开始时间 ■ ...	■ 疗效评价 ■ PD、SD、PR ■ 目标病灶 ■ 非目标病灶 ■ ...	■ 不良事件 ■ 事件分级 ■ 相关程度 ■ ...	■ 肿瘤复发 ■ 肿瘤转移 ■ 生存状态 ■ 死亡原因 ■ ...	■ ...	

图3 肿瘤大数据平台的专科数据字典

#### 4.2.2 肿瘤大数据平台的数据安全与隐私保护

随着医疗数据的采集、加工和应用,不可避免地会发生泄露的情况。一方面,在医院的内部业务流程中有多个节点可以对数据进行访问会造成医院内部信息系统中的隐私泄露;另一方面,在信息平台传递过程中发生的泄露,可能包括科学研究的过程和区域性平台数据交互等。数据的泄露会危及患者个人隐私,可能带来一系列的推销、诈骗等问题。肿瘤大数据平台必须按照安全为先、保护隐私的原则,通过包括对敏感信息的定义、脱敏管理和权限管理等方式进行多层次的数据安全管理。该平台建立了符合国家法规的临床数据权限管理体系严格而不失灵活的权限管理规范,可按角色、场景、特殊字段等分别设定,使得合作的医院更好地发动临床医生和科室参与到临床研究、管理和教学中来,如图4所示。

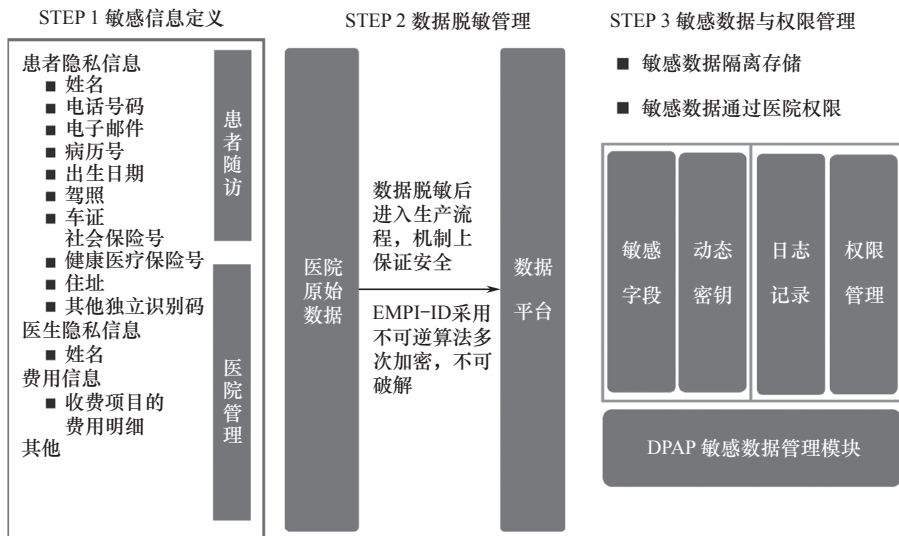


图4 肿瘤大数据平台的多层次数据脱敏管理

### 4.3 肿瘤学大数据平台对肿瘤学研究的支持

#### 4.3.1 肿瘤大数据平台支持高效、灵活的病历检索

跨区域的肿瘤大数据平台可以整合多家医院的所有数据，提供完整病历的搜索引擎。肿瘤大数据平台的搜索引擎，构建在整个数据分布式计算框架之上，基于内存、高效存储介质，通过数据分片技术，实现对全局数据多字段或全文的快速检索，通过大数据平台对原始数据的文本进行后结构化和归一处理，并且通过相关性算法和多种排序过滤策略，保证搜索结果的正确性和精确性。搜索引擎和索引的建立，可以实现在千万份病历中的秒级查询，还可以对关键词做全文智能检索，同时可以支持多条件组合的复杂逻辑关系的精确搜索，满足不同场景下对数据查询的要求。基于科研数据集市，配套纳入、排除标准筛选器，灵活定义指标和筛选逻辑，实时将符合入排标准的研究对象及其观察指标进行筛选并展示；除此之外，肿瘤大数据平台还支持相对时间事件的可视化搜索，灵活定义相对时间事件，解决传统数据平台无法灵活覆盖各类相对时间事件、人工耗时耗力的问题，搜索条件支持临床基础字段集，覆盖常规的检验、检查、症状、疾病生命体征、家族史、婚育史、手术、输液、药品医嘱等，包含非结构化字段的结构化处理结果。

#### 4.3.2 肿瘤大数据平台可展示以患者为中心的全局视图

肿瘤作为一种慢性疾病，患者常常有反复的、较长时间的就诊过程，这给数据的分析研究带来较大挑战。对较复杂的病情，较长治疗周期的患者数据，时间轴是展示整个诊疗行为、病情变化的较好模式，同时将针对此患者、此疾病和诊疗的关键特征通过图形化可关联对比的模式给予呈现，方便医生快速获取有效信息和特征，无论对于病例分析学习，还是科研发现都有非常大的价值。以时间轴的方式展示患者的全治疗周期，记录患者在每一个时间节点的诊断、用药、体征数据、检查、检验、治疗、手术等数据。以前医生通常需要记忆各项检验值和时间，虽然检验结果会出现异常值，但是不会体现

出趋势,也不会体现出与治疗相关、终点事件相关的检验指标,在使用专科数据库后,多项检验信息在时间轴上展现可视化趋势,异常情况一目了然,在时间轴中均能体现。通过对患者时间轴的查看,得出医院常规的诊疗路径,以及特定患者的个性化方案,结合患者治疗效果的对比,可以作为知识库为患者提供更加科学的治疗方案。

#### 4.3.3 肿瘤大数据平台可进行数据分析与挖掘

通过预制分析与挖掘模型,可以从肿瘤大数据平台中挖掘知识库内容。数据模型会分析系统内每一条数据,建立和标准词汇库的关系,从而建立以标准词汇库为基础,包含所有医院真实数据来源的知识库。通过平台维护医院真实数据到标准词汇库的映射关系,记录数据时间版本号、原始值、出现词频、对应的标准值、算法迭代更新的时间。后台通过机器学习加人工标注的方式进行版本的更新迭代,对模型进行持续优化。目前可以达到 90% 以上的准召率。通过上述模型对研究项目内研究对象的基线数据和主要观察指标进行描述性统计,并以数据图表的形式进行呈现;筛选到的临床数据可以导出到医学统计软件进行统计分析;也可以根据医生需求搭建大数据分析和数据挖掘模型处理巨量和高维数据。通过数据挖掘,寻找各种数据之间的相关性,提出科研发现,并为患者提供更优治疗方案。

#### 4.3.4 肿瘤大数据平台可支持真实世界研究

真实世界研究(RWS)是基于真实世界收集的全量患者数据进行,在收集过程中不加以干预,采用统计学的方法从真实世界中挖掘出相关性和有效性证据。研究环境无盲法、无随机对照、无安慰剂治疗,研究结论可直接用于临床实践(以患者为中心的结局研究,研究的实施地点及干预条件为真实临床环境,受试者的选择不加特别限制条件,干预措施也如临床实际);对于 RWS 中发现的单/多因素,其病因上的因果性可以采用随机对照研究进行验证。通过这两种研究方法相结合的方式,可以有效消除统计中的偏移,并大幅度提升研究的效率;基于肿瘤大数据平台,可充分挖掘和分析所汇集的数据,支持符合 GCP 规范的 RCT 和 RWS。

## 5 肿瘤学大数据发展面临的机遇与挑战

### 5.1 我国肿瘤学大数据的现状和挑战

我国医疗健康事业的发展已经进入大数据时代,医学大数据已经成为国家重要的战略资源。深化医药卫生体制改革,实现“健康中国”战略,优化医疗卫生资源,提高医疗技术服务和公共卫生政策精准水平,改善医疗服务公平性与可及性,需要互联网和大数据技术与医疗行业的深度融合。近年来,国家制定了一系列规划和政策以推动医学大数据应用技术的研发建设,通过发展医学大数据整合管理、互联互通、互认共享、分析检索、标准规范、隐私保护等技术,实现医学科学基础研究的突破和技术创新,建设打破部门和机构“信息孤岛化”的互联互通数据共享平台,促进基于医学大数据的医学新知识发现,强化医疗新技术、新策略和新设备的研发和推广应用,提高我国的医疗质量监管、临床辅助诊疗、卫生经济分析和公共卫生政策评价水平,最终提升我国的全民健

康水平，为全面小康建设提供健康基础。国务院办公厅关于《全国医疗卫生服务体系规划纲要（2015—2020年）》（国办发〔2015〕14号）指出，“我国医疗卫生资源总量不足、质量不高、结构与布局不合理、服务体系碎片化、部分公立医院单体规模不合理扩张等问题依然突出”“云计算、物联网、移动互联网、大数据等信息化技术的快速发展，为优化医疗卫生业务流程、提高服务效率提供了条件，必将推动医疗卫生服务模式和管理模式的深刻转变。医改的不断深化也对公立医院数量规模和资源优化配置提出了新的要求。”国务院印发的《促进大数据发展行动纲要》（国发〔2015〕50号）中明确将“医疗健康服务大数据”列入“公共服务大数据工程”，提出要“构建电子健康档案、电子病历数据库，建设覆盖公共卫生、医疗服务、医疗保障、药品供应、计划生育和综合管理业务的医疗健康管理和大数据应用体系。”2016年1月21日，国家发展改革委办公厅正式发布《关于组织实施促进大数据发展重大工程的通知》（发改办高技〔2016〕42号），其中医疗健康大数据应用被列为未来重点发展方向。该通知明确要求“针对我国医疗质量监管、临床辅助诊疗、卫生经济分析、公共卫生政策评价水平不高等问题，建设医学大数据应用技术创新平台，支撑开展医学大数据整合管理、互联互通、互认共享、分析检索、标准规范、隐私保护等技术的研发和工程化。”国务院办公厅印发的《关于促进和规范健康医学大数据应用发展的指导意见》（国办发〔2016〕47号）要求“顺应新兴信息技术发展趋势，规范和推动健康医学大数据融合共享、开放应用”；并经国务院同意，提出了明确的医学大数据发展指导思想，即“以保障全体人民健康为出发点，强化顶层设计，夯实基层基础，完善政策制度，创新工作机制，大力推动政府健康医疗信息系统和公众健康医疗数据互联融合、开放共享，消除信息孤岛，积极营造促进健康医学大数据安全规范、创新应用的发展环境，通过‘互联网+健康医疗’探索服务新模式、培育发展新业态，努力建设人民满意的医疗卫生事业，为打造健康中国、全面建成小康社会和实现中华民族伟大复兴的中国梦提供有力支撑。”

同时我们必须认识到，我国肿瘤学医疗信息化水平不高。改革开放以来，我国不断深化医疗卫生体制改革，卫生与健康事业获得了长足发展，医疗卫生服务可及性和人民群众健康水平显著提高，初步实现了“人人享有基本医疗卫生服务”的目标。随着基本医疗服务体系的建成，让全体中国人享有更高水平的医疗服务是我们重要的奋斗目标。然而，与欧美国家相比，我国的医疗信息化发展仍相对落后，主要体现在核心技术研发能力不足、医疗机构信息化水平不高、借助信息技术在医疗领域的应用能力较弱等。基本医疗体系存在医疗质量监管、临床辅助诊疗、卫生经济分析、公共卫生政策评价分析水平不高等问题。借助大数据提升、医疗信息化水平来有效解决这些问题是迈向更高水平医疗服务的必由之路。

互联网及大数据技术的出现，大大推动了医学科学的发展，使得“互联网+大数据+医疗”日趋成为一种新的医疗趋势。通过全面智能的数据采集、规范标准的数据管理、系统深度的数据分析挖掘以及以患者为中心的转化应用，以医学大数据为基础的医疗变革正在逐渐颠覆传统医疗模式。目前，这种变革的苗头已经出现——医学大数据大容量和全覆盖特性，直接促成了全球及我国“精准医学”计划的实施。我国于2016年启动的“精准医学研究”重点专项，目前已经正式进入实施阶段。专项提出了非常明确



的实现目标，并按照全链条部署、一体化实施的原则，部署了新一代临床用生命组学技术研发、大规模人群队列研究、精准医学大数据的资源整合 / 存储 / 利用与共享平台建设、疾病防治方案的精准化研究、精准医学集成应用示范体系建设 5 个主要任务。某种角度上来看，这 5 个主要任务是针对医学大数据的采集技术、疾病队列、资源整合、存储共享的综合运用，进而指导疾病的精准防治和应用示范。“精准医学研究”计划的启动实施，必将积极地推动生物技术和信息技术在医学临床实践的交汇融合应用，促进我们对于疾病谱的医学大数据的积累和知识发现。与“精准医学研究”以病种为主线的医学大数据全链条整合研发应用相呼应，医学大数据国家工程实验室将以承担单位为主体，强调“医学产学研用”一体化，瞄准医学大数据的互联互通和转化应用，促进技术突破及其工程化。因此，医学大数据国家工程实验室的建设，是对我国“精准医学研究”计划的绝佳补充，两者的有机结合将推动我国的医学模式从传统医学向精准医学和个性化医学转变。组建医学大数据应用技术国家工程实验室，是适应新时代医学模式变革趋势的前瞻性部署，具有极为重要的意义。

## 5.2 肿瘤学大数据的发展方向

医学大数据在肿瘤学中具有广泛的应用前景，基于肿瘤学大数据的医疗质量监管、临床辅助诊疗、卫生经济分析、公共卫生决策、精准医学研究等应用，都将显著促进社会医疗资源的整合和医疗系统水平的提高，并最终反映到人民群众的整体健康程度提升上，进而创造巨大的社会价值和经济价值。

由于肿瘤学临床医疗自身业务复杂性、利益群体多样性、信息化程度不均一性、医疗数据的非结构化特性等特点，使得肿瘤大数据共享成为一个全球性的难题。随着信息技术快速发展，医疗信息化产生的海量数据已经日趋成为推动医疗创新的基础，但医学大数据的有效聚合和共享是其得以使用的前提。必须建立规范化肿瘤学大数据采集、存储、管理、规范、交换和检索等集成系统，结合医学术语标准体系、资源目录体系以及数据质控和安全体系，为医疗服务提供机构及其他相关机构之间的大数据互联共享提供平台支撑。实现不同来源数据资源的汇聚、不同类型不同层次医疗相关数据的整合、不同机构医疗相关数据的安全互认，形成与医疗相关的一系列数据库，最终夯实肿瘤学大数据在技术平台支撑下的互联共享。

同时，医疗机构、研究机构、数据使用方及 IT 产业界必须实现“产学研医”联动，实现医疗健康相关研究成果的应用转化。各相关方的无缝合作必将有效推动研发成果的转化和产业化：建成后的技术平台将成为技术研发和应用转化的基础支撑，而我国大量医疗 IT 公司积累的丰富经验也将为基于平台的研发成果的产业化提供实施保障。此外，基于医学大数据应用技术平台产生的技术突破、标准产出和应用示范，也会直接影响肿瘤学临床医疗层面上的诊治方案和预后评估等。

肿瘤学大数据的长足发展有赖于在大数据规范采集及标准化技术、大数据安全技术、肿瘤学本体术语服务技术、医学大数据搜索引擎技术、肿瘤学临床数据表型组构建技术、肿瘤学临床数据与组学数据融合分析技术等医学大数据领域内多个瓶颈环节上获得突破。这些技术的突破将极大地推动医学大数据的整合管理、标准规范、隐私保护、



检索分析及挖掘应用等方面综合水平的提高,研发产生的标准和模型经过验证后,将形成系列肿瘤学大数据行业内的标准规范,通过后续应用推广,可推动我国肿瘤学大数据领域整体建设水平的提高。

肿瘤学大数据的应用发展有赖于大数据应用技术创新平台。围绕医疗质量监管、临床辅助诊疗、卫生经济分析、公共卫生政策评价以及精准医学支撑等几个重要应用方向,构建出系列数据模型和分析子系统,将极大地提升基于医学大数据的医疗决策和研发水平,解决目前状态下我国医疗结构备受困扰的几大难题。因此,必须加强医学大数据应用技术创新平台的建设,形成一个基础性的医学大数据应用支撑平台,以提升我国医疗信息化程度和大数据应用水平。

肿瘤学大数据的持续发展需要进行肿瘤学大数据领域的人才队伍建设。我国的医疗机构及科研机构需要展开密切的学术合作交流,不断培养具有良好发展潜质的医学大数据相关高层次专业人才和现代化实验室管理人才,打造高水平国家级工程化实现团队和科研创新团队,为我国健康产业发展和应用提供人才支持。为了积极推动肿瘤学大数据平台的医疗问题解决能力,还需要建立针对以临床医生为主的群体的数据挖掘分析培训计划,培养一批以医学大数据应用为导向的肿瘤学临床医生。

### 参 考 文 献

- [1] Toga AW, Foster I, Kesselman C, et al. Big biomedical data as the key resource for discovery science[J]. Journal of the American Medical Informatics Association, J Am Med Inform Assoc, 2015, 22(6): 1126-1131.
- [2] Beyer MA DL. The Importance of 'Big Data': A Definition. <http://www.gartnercom/it-glossary/big-data/2012>.
- [3] Dinov ID. Methodological challenges and analytic opportunities for modeling and interpreting Big Healthcare Data[J]. GigaScience, 2016, 5:12.
- [4] Baro E, Degoul S, Beuscart R, Chazard E. Toward a Literature-Driven Definition of Big Data in Healthcare. BioMed research international 2015, 2015:639021.
- [5] Vicini P, Fields O, Lai E, et al. Precision medicine in the age of big data: The present and future role of large-scale unbiased sequencing in drug discovery and development[J]. Clinical pharmacology and therapeutics, 2016, 99:198-207.
- [6] Collins FS, Varmus H. A new initiative on precision medicine[J]. The New England journal of medicine, 2015, 372:793-795.
- [7] Hochster HS, Niedzwiecki D. Big Data, Small Effects. J Clin Oncol, 2016, 34(11): 1170-1171.
- [8] Papolos A, Narula J, Bavishi C, Chaudhry FA, Sengupta PP. U.S. Hospital Use of Echocardiography: Insights From the Nationwide Inpatient Sample[J]. Journal of the American College of Cardiology, 2016, 67:502-511.
- [9] Minikel EV, Vallabh SM, Lek M, et al. Quantifying prion disease penetrance using large population control cohorts[J]. Science translational medicine, 2016, 8(322): 322ra9.
- [10] Yan X, Chu JH, Gomez J, et al. Noninvasive analysis of the sputum transcriptome discriminates clinical

- phenotypes of asthma[J]. American journal of respiratory and critical care medicine, 2015, 191: 1116-1125.
- [11] Xu RH, Wei W, Krawczyk M, et al. Circulating tumour DNA methylation markers for diagnosis and prognosis of hepatocellular carcinoma.Nat Mater. 2017 Oct 9. doi: 10.1038/nmat4997. [Epub ahead of print].
- [12] Bourne PE, Bonazzi V, Dunn M, et al. The NIH Big Data to Knowledge (BD2K) initiative[J]. Journal of the American Medical Informatics Association, 2015, 22:1114.
- [13] Nikpay M, Goel A, Won HH, et al. A comprehensive 1,000 Genomes-based genome-wide association meta-analysis of coronary artery disease[J]. Nature genetics, 2015, 47: 1121-1130.
- [14] Consortium EP. The ENCODE (ENCyclopedia Of DNA Elements) Project. Science 2004, 306:636-640.
- [15] Cancer Genome Atlas Research N, Weinstein JN, Collisson EA, et al. The Cancer Genome Atlas Pan-Cancer analysis project[J]. Nature genetics, 2013, 45:1113-1120.
- [16] Mateo J, Carreira S, Sandhu S, et al. DNA-Repair Defects and Olaparib in Metastatic Prostate Cancer[J]. The New England journal of medicine, 2015, 373:1697-1708.
- [17] Jiang P, Liu XS. Big data mining yields novel insights on cancer[J]. Nature genetics, 2015, 47:103-104.
- [18] Fehrmann RS, Karjalainen JM, Krajewska M, et al. Gene expression analysis identifies global gene dosage sensitivity in cancer[J]. Nature genetics, 2015, 47:115-125.
- [19] Cyranoski D. China embraces precision medicine on a massive scale[J]. Nature, 2016, 529:9-10.
- [20] Edgar R, Domrachev M, Lash AE. Gene Expression Omnibus: NCBI gene expression and hybridization array data repository[J].Nucleic Acids Res, 2002, 30(1):207-210.
- [21] Barrett T, Wilhite SE, Ledoux P, et al.NCBI GEO: archive for functional genomics data sets--update[J]. Nucleic Acids Res, 2013, 41(Database issue):D991-995.
- [22] Abecasis GR, Altshuler D, Auton A, et al. A map of human genome variation from population-scale sequencing[J]. Nature, 2010, 467(7319): 1061-1073.
- [23] Chin L, Andersen JN, Futreal PA. Cancer genomics: from discovery science to personalized medicine[J]. Nat Med, 2011, 17:297-303.

### 作者简介



徐瑞华，医学博士（M.D., Ph.D.）。中山大学肿瘤防治中心院长、所长，华南肿瘤学国家重点实验室主任，国家新药（抗肿瘤药物）临床试验中心主任，教授，博士生导师，国务院政府特殊津贴专家，南粤百杰。教育部科技委生物与医学学部委员，中国抗癌协会副理事长，中国临床肿瘤学会（CSCO）副理事长，中国医药生物技术协会副理事长，广东省抗癌协会理事长，中国抗癌协会靶向治疗专业委员会主任委员。《Chinese Journal of Cancer》主编。国家食品药品监督管理局（CFDA）药物审评咨询专家。2016 年获得国家科技进步二等奖及省部级科技进步一等奖 3 项。2016 年入选广东省特殊人才支持计划杰出人才（百名南粤杰出人才培养工程）。2007 年入选教育部新世纪优秀人才。在国际上重要的学术期刊上，包括《Nature Materials》《Lancet Oncology》《Journal of Clinical Oncology》《Hepatology》等，共发表论文 250 余篇，其中通讯或第一作者的 SCI 论文 110 余篇。

## 信息技术在医学超声工程领域的应用

陈思平 陈 昕 沈圆圆 郭燕荣 和晓念 温慧莹

(深圳大学生物医学工程学院, 医学超声关键技术国家地方联合工程实验室)

### 摘 要

医学超声工程是以超声波为探测信息的载体或能量源, 依托电子技术、计算机技术、信号处理方法等工程技术手段, 利用超声波与人体组织相互作用后的声学特性和生物学效应来诊断或治疗疾病。以医学超声成像为例, 从最初一维信息的 A 超扩展到二维图像信息的 B 超, 以及结合血流运动信息的彩超, 其发展史就是一部不断发现回波中新的隐含信息的历史。近年来研究人员运用各种交叉学科的综合信息, 主要从两个方面来促进医学超声工程的发展。一方面可以在发射超声中加入更多信息, 如编码超声成像; 另一方面可以将超声和其他物理技术结合起来, 使超声回波中携带更多信息, 如弹性成像、磁声成像、光声成像、微泡造影成像等。这些新技术的出现使医学超声工程向着功能诊断、精准医疗方向发展。

### 关键词

医学超声工程; 信息技术; 交叉学科

### Abstract

Medical ultrasound engineering uses ultrasound as a carrier or source of energy for the information detection. Based on the engineering techniques such as electronic technology, computer technology and signal processing method, medical ultrasound engineering utilizes acoustic characteristics and biological effects, which are induced by the interaction between ultrasound and human tissues, to diagnose or treat diseases. For example, the development of medical ultrasound imaging extends from the original one-dimensional A-mode information to the two-dimensional B-mode image, and then to the color Doppler imaging associated with blood flow. This development history consists of continuous discovery of the implicit information from the ultrasound echo. In recent years, researchers have used a variety of interdisciplinary comprehensive information to promote the sustainable development of medical ultrasound engineering. On the one hand, more information is incorporated into transmitted ultrasound. Coded ultrasound imaging is a good example. On the other hand, ultrasound is combined with other physical technology to induce more information in ultrasound echo. Ultrasound elastography, magneto-acoustic tomography, photoacoustic imaging, and microbubble contrast imaging are such examples. These new technologies are promoting medical ultrasound engineering in the directions of functional diagnosis and precision medicine.

### Keywords

Medical Ultrasound Engineering; Information Technology; Interdiscipline

## 1 背景

医学超声工程是生物学、医学、声学 and 工程技术等学科相互结合的产物，其理论基础是声学特别是超声学原理，其实现手段是现代工程技术尤其是电子、计算机和信息技术。医学超声通常是指频率为  $0.1 \sim 50\text{MHz}$  区间内的声波。超声作为一种机械波，具有波的一般属性。当超声波在生物组织内传播时，组织对超声波产生反射、散射、衍射等波动效应。从回波中获得组织的声速、声衰减、背向散射系数、多普勒频移、非线性参量等声学信息，进而识别、判断人体组织的生理和病理信息，诊断疾病。每一次超声回波隐含信息的发现都促进了医学超声成像技术的突破，其发展史就是一部不断发现隐含信息的历史<sup>[1]</sup>，医学超声也从最初一维信息的 A 超扩展到二维图像信息的黑白超声（B 超），以及结合血流运动信息的彩超。

近年来，随着电子、计算机、材料、生物等各学科的提升，医学超声工程有了更大的发展空间，不断挖掘更多信息，其发展集中在以下三个方面。①和其他的物理方法结合在一起，发掘更多定量的功能信息，提供病灶的全面情况。传统的超声成像是从超声回波中提取人体组织解剖形态以及血流大小和方向等信息。这些定性或者半定量的信息远远不能满足临床的实际要求。长期以来大量的基础研究在寻找各种新的成像参数或组织定征的方法，使得超声诊断可以从解剖成像、定性分析向功能化、量化、分子影像化发展，最新的技术如超声弹性成像、磁声成像、磁热声成像、磁声电成像、光声成像等，已经在历经 20 多年的实验室研究之后形成商用产品。②提高成像分辨率和成像帧率，在更小的尺度上发现病灶，以及更清楚地观察组织运动。近年来，出现了超高速超声成像技术，通过创新的激励采集模式，可以获得 1 000 帧/秒的速度，实现亚毫秒级的超高速成像。目前，超高速成像技术已经在法国 SuperSonic Imagine 公司的彩超系统上实现。超分辨超声成像技术的关键是将少量超声微泡造影剂注入血液，然后利用超高速成像技术以每秒 500 帧的速度对鼠脑成像，并检查连续图像之间的差异。通过定位超声微泡信息中心位置，并将一段时间内拍摄的数千张图像叠加，即可以合成老鼠血管高分辨图像。该成果已经于 2015 年发表于 Nature 期刊，目前还处于实验室阶段。③利用超声的力学效应和热效应获取更多信息。超声不仅在诊断领域发挥着重要的作用，在治疗领域也占有重要席位。超声治疗涵盖了许多方面，如超声理疗、超声药物透入、超声雾化、超声碎石、超声乳化、超声溶栓、高强度聚焦超声等。随着超声微泡技术的发展，低频低强度聚焦超声联合微泡介导的药物输送越来越受到研究者的重视，尤其是在脑部疾病的药物输送方面，在治疗领域具有很大的潜力。除此之外，超声波实现神经调控的研究近几年逐渐开展起来，使得医学超声有望在脑中枢神经系统类疾病和神经调控这两类前沿领域扮演重要角色。

## 2 信息技术在医学超声工程领域的具体应用

围绕上述三个方面，医学超声工程在原理、技术、应用方面都有新的发展，取得了

卓有成效的进步。下面将从这三个方面介绍国内外发展现状和趋势，并结合本项目团队的工作进行具体研究的介绍。

## 2.1 利用超声力学效应实现粘弹性信息提取

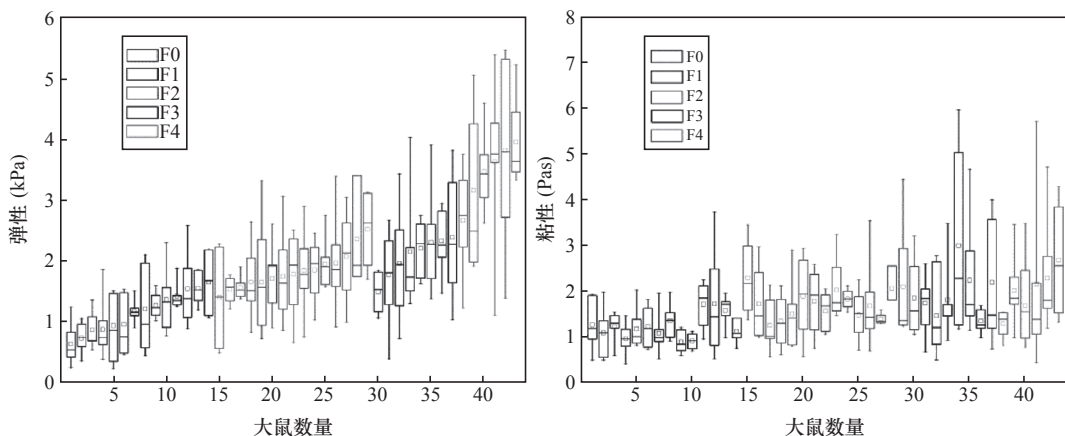
临床实践发现，生物组织的硬度或者弹性的变化往往与组织的病变程度密切相关，如常见的乳腺癌、前列腺癌等恶性疾病，其组织的硬化程度明显大于病变前的正常组织<sup>[2]</sup>。在临床实践中，医生主要采用触诊的方法感知病灶区域硬度，作为肿瘤良恶性判断依据。然而触诊很大程度上依赖于医生的主观经验，并且对深部的组织无法检测。

超声弹性成像技术是近年来出现的一种新型超声成像技术，它利用超声检测软组织的力学特性，具有无创、快速、可重复检测等优点。美国 Texas 大学 Ophir 教授领导的研究组于 1991 年首次报道了利用准静态施压的方法获得的组织内部应变分布图，并首次提出超声弹性成像（Ultrasound Elastography）的概念<sup>[3]</sup>。这项开创性的研究影响深远，突破了超声只用于解剖成像和血流成像的限制，证明超声还可对组织的力学特性成像。日本的 Hitachi 公司于 2005 年推出的超声诊断仪首次提供了超声弹性成像功能，称为实时组织弹性成像。法国 Echosens 公司根据低频振动激励方法技术，在 2001 年研发了 FibroScan 产品，专门用于肝脏硬度测量，在临床得到了广泛应用。更多的弹性成像技术采用声辐射力来局部激励人体内部组织，利用超声力学效应进行检测，例如，声辐射力脉冲成像，超音剪切波弹性成像等。相应产品包括西门子公司的 ACUSON S2000 系统，法国 SuperSonic Imagine 公司的 Aixplorer 系统<sup>[4]</sup>。

超声弹性成像技术现已广泛应用于临床肝脏、乳腺、前列腺等部位的疾病检测<sup>[5]</sup>。但是该技术还处于不断发展过程中，各种新方法、新应用不断涌现。本项目团队在国家自然科学基金重点项目（61031003）的支持下，对弹性成像关键技术进行深入研究，从中挖掘更多信息。人体组织同时具有弹性和粘性，都与人体生理病理特征密切相关，而粘性与激励频率密切相关。现有超声弹性成像技术的激励频率一般限制在单个频率（50Hz 左右），只检测弹性信息。本项目团队首次将正交编码技术应用于超声弹性成像，从现有的单频测量变成宽频带测量，将激励频率范围扩展到 1 000Hz，为弹性成像提供更多的信息量<sup>[6]</sup>。本项目团队还将新技术应用于肝脏疾病的动物模型，如肝纤维化、脂肪肝，研究了疾病发展过程中肝脏粘弹性的变化情况（见图 1）。项目成果发表在医学超声领域的顶级期刊 Ultrasound in Medicine and Biology, Ultrasonics, IEEE Trans UFFC 等。

本项目团队还对超声弹性成像设备的检测方法进行了研究，主持制定了中国医药行业标准——《基于声辐射力的超声弹性成像设备性能试验方法》（YY/T 1480—2016）。该标准填补了国内外检测基于声辐射力方式的超声弹性成像设备性能的空白，使我国在该类产品的注册时，对该项性能的规范有了依据。本项目团队还将该标准在行业内推广应用，多个企业已经将该标准用于相关产品的弹性成像功能开发和性能检测，完成了新产品的开发。这对促进我国医疗器械产业的发展，扩大国际影响力具有重要意义。



图1 肝纤维发展过程中肝脏粘弹性变化的情况<sup>[7]</sup>

## 2.2 利用流变技术进行生物力学信息提取

生物流变学是研究生物组织对荷载作用的响应,这种响应通常通过描述组织力学性质的本构方程来表征<sup>[8]</sup>。本构方程中的参数往往根据大量实验数据分析得到,在一定程度上反映了生物组织的生理状态。例如,当关节炎发生时,关节软骨的渗透系数和聚散模量将明显改变。因此,通过对生物组织力学参数的测量,可在一定程度上预测某种疾病的发生。

Fung 等人经过大量实验提出了以实验为基础的表象模型,即粘弹性模型。他认为生物软组织在本质上是一种粘弹性材料,其兼具弹性固体性质和粘性流体性质<sup>[9]</sup>。对于材料在稳态谐振条件下的力学行为,通常采用振动试验方法来研究粘弹性体在交变应力作用下的稳态响应,如有关动态粘弹性能的物理量——复模量、储能模量、损耗模量和损耗因子等。国内外的一些研究者将流变力学技术应用到人体的离体器官,如脑组织、肝脏、骨骼等部位中的评估<sup>[10-12]</sup>。

本项目团队基于动态力学分析技术(Dynamics Mechanical Analysis, DMA)测量组织流变力学属性,采用的仪器是 ElectroForce3 200 仪器(美国 Boss 公司),实验系统如图 2 所示。

通过系统的剪切波振荡模式可以对生物组织样品施加一个交变应力  $\sigma(t)=\sigma_0 e^{j(\omega t+\delta)}$ ,产生一个相应的交变应变  $\varepsilon(t)=\varepsilon_0 e^{j\omega t}$ ,组织的复模量  $G^*$  被定义为应力和应变的比值:

$$G^*(\omega)=\frac{\sigma(t)}{\varepsilon(t)}=\frac{\sigma_0 e^{j(\omega t+\delta)}}{\varepsilon_0 e^{j\omega t}}=\frac{\sigma_0}{\varepsilon_0}(\cos \delta+j \sin \delta)=G'(\omega)+j G''(\omega) \quad (1)$$

其中,  $G'$  是储能模量,  $G''$  是耗能模量。通过假设生物组织的力学模型,可以将储能模量和耗能模量与组织的粘弹性联系起来。例如,假设组织符合 Voigt 模型,则

$$G'=\mu, G''=\omega \eta \quad (2)$$

其中,  $\mu$  和  $\eta$  分别是弹性系数和粘性系数。

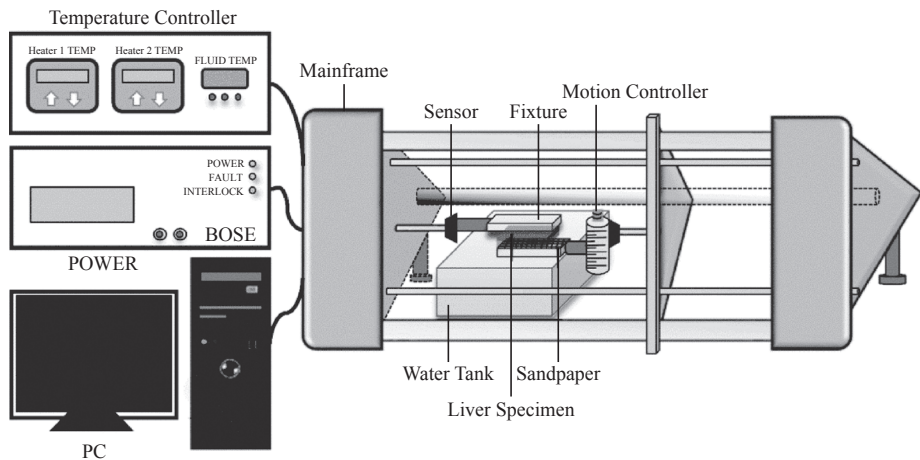


图2 动态力学分析测试实验示意图

本项目团队将动态力学分析技术应用于肝脏疾病的动物模型，如肝纤维化、脂肪肝，并将动态力学分析的结果与超声弹性成像测量的结果对比，评估超声弹性成像技术对粘弹性测量的准确性。图3是对脂肪肝动物模型同时进行弹性成像（SWE）和动态力学分析（DMA）的实验结果。对不同的脂肪肝严重程度（S0～S4），SWE和DMA得到的弹性系数有类似的结果，但是粘性系数之间存在一个偏差。主要原因是SWE和DMA采用了不同频率的振动，而粘性系数对频率的依赖较大。

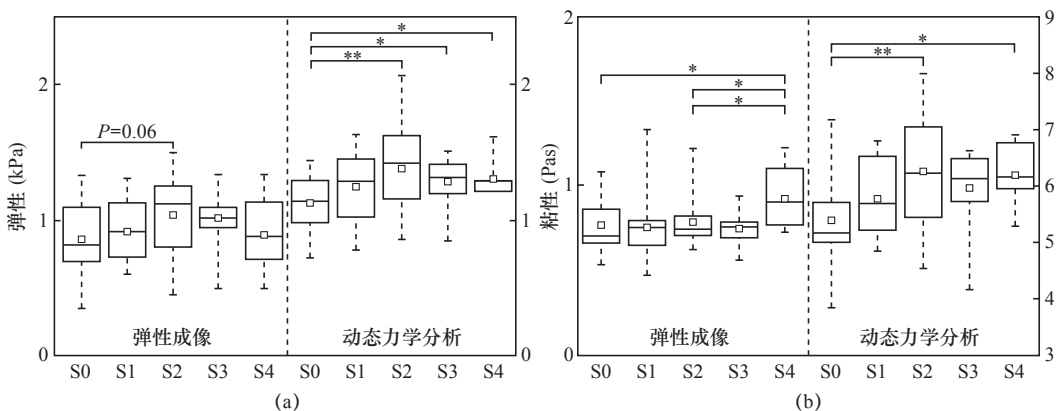


图3 超声弹性成像与动态力学分析的实验结果对比

### 2.3 利用磁声电成像技术进行电导率信息提取

生物组织类型、含水量、温度等状态会使电导率发生明显变化，而病理和生理的变化将改变组织细胞膜通透性和细胞液浓度，从而影响电阻抗特性。因此，可以通过检测生物组织电学特性的改变来早期发现病理、生理异常，为疾病早期诊断提供信息<sup>[13]</sup>。对电特性的检测有多种方法：电阻抗成像（Electrical Impedance Tomography, EIT）、

磁声成像 (Magneto-Acoustic Tomography, MAT)、磁声电成像 (Magneto-Acoustic-Electrical Tomography, MAET)。EIT 方法采用各种方法给人体施加小的安全驱动电流 / 电压, 通过驱动电流或电压在人体的测量响应信息, 重建人体内部的电阻率分布或其变化的图像。MAT 和 MAET 方法是基于声场、电场和磁场相互耦合作用的成像方法, 有两种不同的实现方式<sup>[14]</sup>。一种方式是对置于静磁场中的生物组织施加交变磁场, 从而引起生物组织振动, 对振动的声信号接收以实现组织电导率的重构。另一种方式是对静磁场中的生物组织施加声辐射力, 引起组织的局部振动而产生交变电流, 通过对电信号的检测重建电导率的图像。目前 MAT 和 MAET 的实验平台和方法还处于实验室阶段, 达到临床成像还有很长的路要走。

中国科学院电工所刘国强教授团队提出了线性调频 (LFM) 激励模式的磁声电成像方法, 这种方法利用距离和频率偏移的关系, 将电导率空间检测的分辨率转化为频谱的分辨率, 具有很高的成像分辨率。该团队通过 COMSOL 仿真软件对成像过程进行了仿真, 并通过实验获得生物组织 1mm 电导率轴向分辨率<sup>[15]</sup>。该团队还对猪肉样品进行了电导率成像<sup>[16]</sup>, 实验结果如图 4 所示。猪肉 ①②③ 分别代表猪肉的肥肉和瘦肉的分界面, 重建的电导率图像和猪肉的电导率分界面可以一一对应。

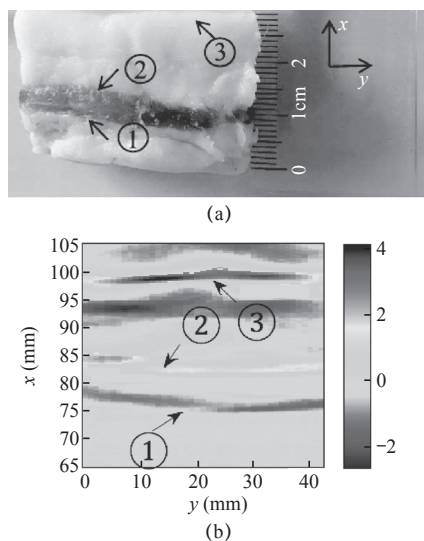


图 4 猪肉样品的电导率图像

本项目团队与刘国强教授团队合作, 在国家自然科学基金重大科研仪器研制项目 (61427806) 的支持下, 提出了一种全新的多模态成像方法: 基于声辐射力-洛伦兹力的超声-磁电双模成像方法。该方法的核心是通过声辐射力将弹性和磁声两种成像模式结合在一起, 同时获取组织的形态结构、力学特性、电学特性。

本项目团队开发的实验平台如图 5 所示, 平台由超声激励源、运动控制及检测平台、Verasonics 控制与数据采集平台三部分组成。其中超声激励源包括信号发生器和功率放大器。运动控制及检测平台由 XY 方向可自由运动的导轨、嵌入导轨中的超声功率探头、静磁体、夹在磁体中的检测水槽, 以及金属铜电极等部分组成, 其中静磁体空间大小为

10 cm×10 cm×4 cm，中心区域场强约为 0.45 T。Verasonics 控制与数据采集平台用于电极接收微弱电压信号，14 位 ADC 采集、滤波等数字信号处理及整个系统时序的控制。

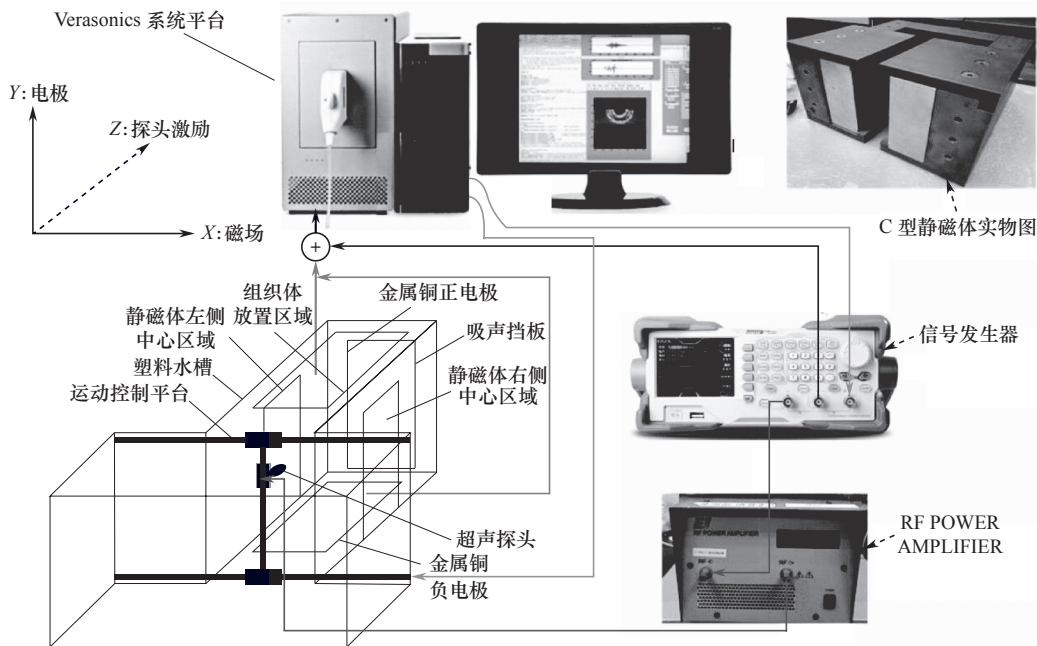


图 5 双模成像实验平台

### 2.4 利用编码检测技术提高成像分辨率

交叉学科的发展促进了医学超声工程的持续发展。将通信领域的编码检测技术应用用于超声成像，可以提高成像分辨率。O'Donnell 的研究发现，通过编码激励技术可以在不降低分辨率的情况下将成像系统的信噪比提高 15 ~ 20 dB<sup>[17]</sup>。目前商业化的超声设备中部分已经采用了编码激励技术。例如，西门子公司采用 LFM 编码信号，GE 公司采用 Golay 码作为编码发射信号。如何将编码激励技术成功地应用到医学超声成像系统中，仍然是一个值得研究的问题。

超声弹性成像的一个主要难点是激励产生的振动信号（通常又称为剪切波）幅度微弱，而且剪切波在体内衰减大，尤其是高频成分，传播距离只有毫米量级。因此，超声弹性成像中通常会存在检测信噪比不高、检测深度不够的问题。Walker 和 Trahey 的研究结果表明剪切波振动信号的信噪比由超声回波信号的信噪比决定<sup>[18]</sup>。国外的研究人员已经将编码检测应用于超声弹性成像，在保证检测分辨率的基础上提高检测超声信号信噪比，进而提高剪切波的信噪比<sup>[19]</sup>。

本研究团队将超声编码检测技术应用于瞬时弹性成像<sup>[20]</sup>，有效提高成像性能。研究中采用商业弹性体模型（Model 049，美国 CIRS 公司）对超声瞬时弹性成像编码检测的性能进行评估研究。为了突出编码检测的优势，在室温下，将一块厚度约 2.0cm 的新



鲜猪肉层放置在标准弹性体表面, 增加超声信号的衰减。瞬时振动的低频信号设置为周期 50Hz, 幅度以 0.2Vpp 为电压间隔从 0.1Vpp 到 0.9Vpp, 产生不同强度的剪切波。分别采用常规短脉冲、Barker 7 和 Barker 13 编码脉冲对弹性体进行瞬时弹性成像检测。

实验所获得的剪切波时间-距离图像如图 6 所示<sup>[21]</sup>。在 0.1Vpp 电压下, 常规短脉冲检测所得图像背景噪声相当严重, 剪切波运动轨迹几乎无法辨别。而编码检测所得图像的背景噪声得到了一定程度的抑制, 剪切波运动轨迹基本可辨。随着电压设定的升高, 剪切波运动图的背景噪声得到抑制。

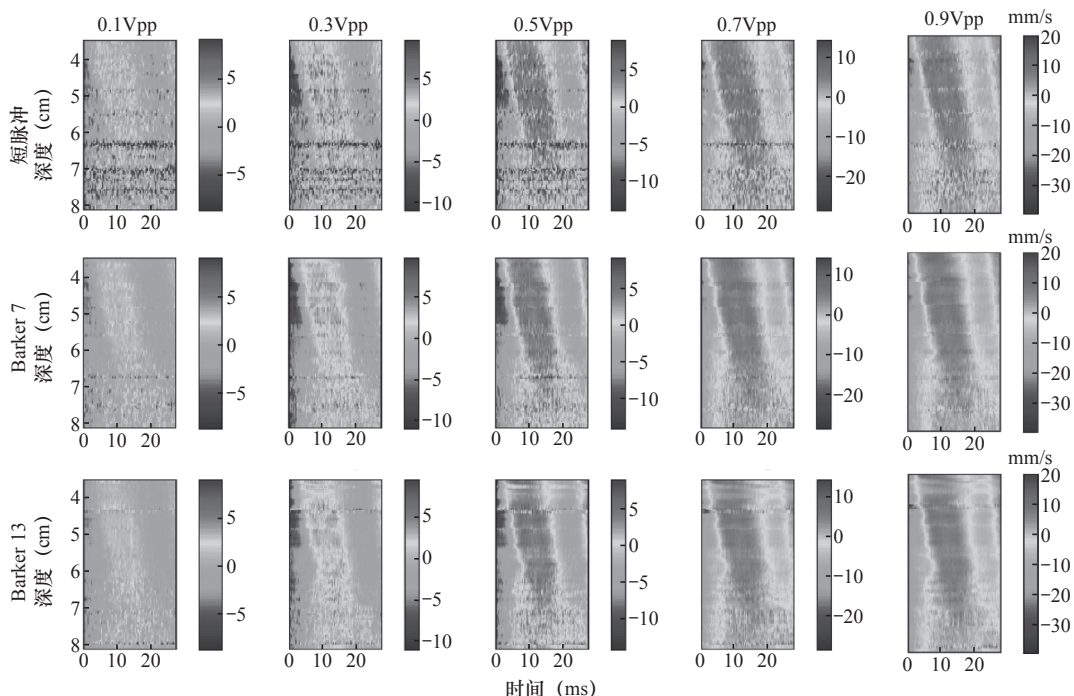


图 6 加有猪肉层的标准弹性体实验所得的剪切波运动图

## 2.5 利用超声空化效应的非线性声学信息进行血脑屏障开放研究

超声分子影像以超声造影剂作为超声分子探针, 能够在分子水平无创显示炎症、血栓、肿瘤等, 并可携带药物/基因进行靶向治疗。20世纪90年代初, 超声造影剂的制备、理论及应用研究工作取得了很大进展。造影微泡在超声声场中具有复杂的理化表现, 造影增强的回声信号不仅包含共振频率(即基频), 而且包含高阶谐波和次谐波以及超谐波的能量成分。当声压升高到一定临界点时, 微泡将发生破裂, 瞬间释放出短暂的较高强度宽频信号<sup>[22]</sup>。

除了造影增强功能, 超声微泡还可以用于靶向治疗, 其中将具有治疗作用的药物分子靶向性、高效率地转运至脑内一直是个巨大的挑战。靶脑给药首先遇到的障碍即是血脑屏障。血脑屏障的存在, 使得分子量大于 400Da 的分子无法通过, 一方面保证了脑的内环境的高度稳定性, 但同时也阻碍了许多有潜在治疗价值的大分子物质进入脑内,



影响疾病的治疗效果。近年来的国内外动物实验研究发现,低频聚焦超声联合微泡可短暂性地促进伊文氏蓝和钆离子通过多种形式跨越血脑屏障,且病理切片显示神经元细胞未见损伤,避免了传统开放方法的局限性和副作用,提示了低频聚焦超声联合微泡的方法能可逆、靶向、局部开放血脑屏障,为提高中枢神经系统疾病药物靶向输送和治疗开辟了一个新途径<sup>[23-25]</sup>。

目前许多动物实验已证实低频低能量超声联合微泡能够介导多种大分子药物进入脑组织,如抗肿瘤药物、抗体类药物等,并在动物模型(脑胶质瘤模型、阿尔茨海默症模型)上验证了该方法的有效性<sup>[26-28]</sup>。2015年11月,加拿大的Sunnybrook健康科学中心的科学家和医生将该技术首次在脑胶质瘤病人身上进行了第一例临床试验,输送抗癌药物阿霉素进入脑组织。

本研究团队对超声联合微泡开放血脑屏障进行了深入研究,评估血脑屏障开放通透性与安全性,以及临床药物血脑屏障输送治疗的新方法。研究首先验证不同声压、微泡剂量条件下血脑屏障开放的通透性,四个分组小鼠伊文思蓝的蓝染效果分别如图7所示。小鼠左脑超声辐照部位均出现蓝染,而未经超声辐照的右脑未出现蓝染,证实了四组参数条件下血脑屏障都能够有效开放。并且当微泡剂量一定时,声压为0.64 MPa的蓝染程度比声压为0.53 MPa的加深,同时随着微泡剂量的增加,蓝染颜色也相应地加深<sup>[26]</sup>。

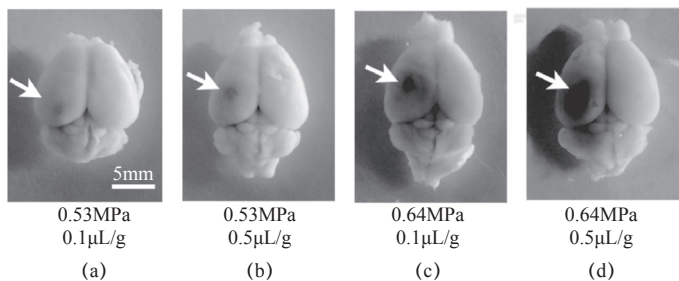


图7 超声联合微泡开放小鼠血脑屏障后伊文思蓝进入脑组织(不同声压和微泡剂量的蓝染效果)

本研究团队进一步进行了超声联合微泡介导紫杉醇进入脑组织的实验,进行脑胶质瘤模型动物模型的治疗<sup>[30]</sup>,其示意图如图8所示。

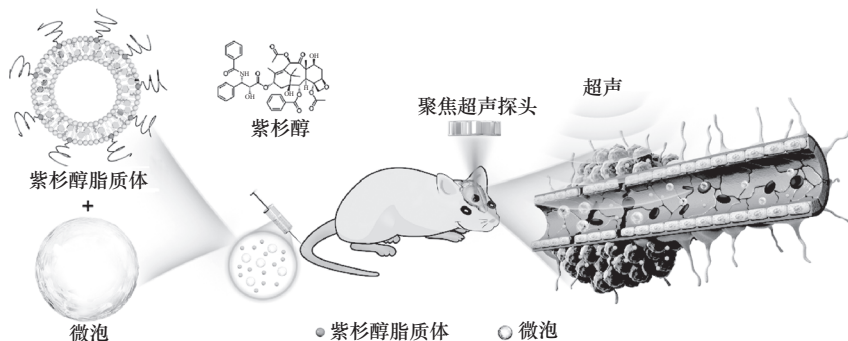


图8 超声联合微泡介导紫杉醇治疗脑胶质瘤示意图

实验动物共分为4组：对照组（Control），超声微泡组（FUS+MB），给药组（PTX-LIPO），超声微泡给药组（FUS+MB+PTX-LIPO）。采用MRI扫描、生存时间分析、免疫组化和病理组织分析等评估疗效，采用HPLC法对紫杉醇药物在体内分布研究以及药物在体内代谢时长进行综合评估疗效。从移植细胞第10天开始治疗，共治疗3次，每次间隔两天，每3天扫描一次MRI以测量肿瘤的大小，监控肿瘤生长。通过MRI成像可以看到，超声微泡组和对照组在种植肿瘤两周后肿瘤均生长迅速；给药组肿瘤生长略微有所抑制；而超声微泡给药组表现出显著的抑瘤作用（见图9）。

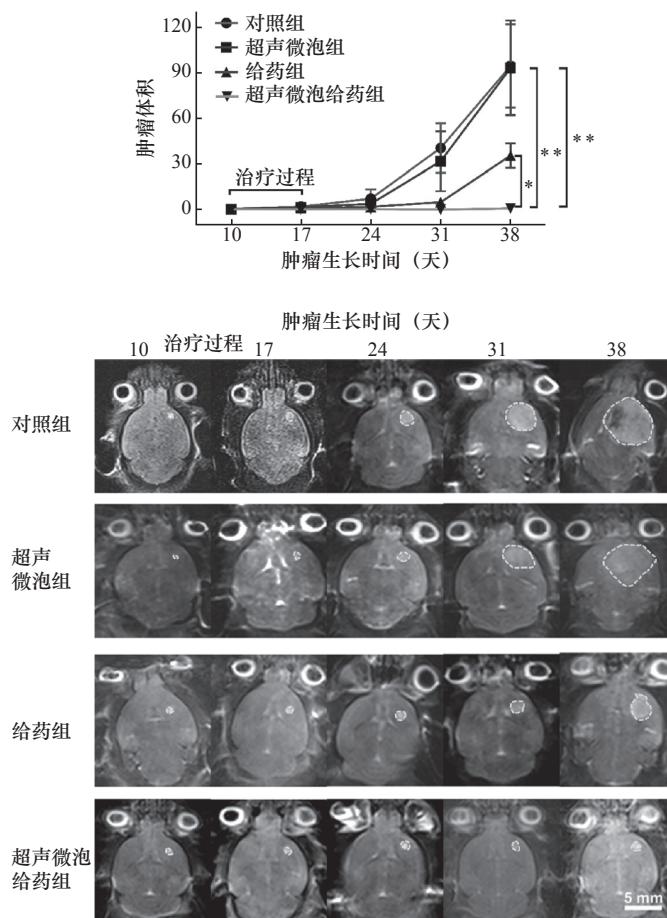


图9 不同时间点的各组MRI图像及肿瘤大小

## 2.6 有关医学超声特性其他信息的提取和应用

超声兼具有波动效应、力学效应和热效应，这些效应在生物医学中有着不同的应用。利用超声的波动效应可以实现B超、彩超等超声成像诊断。利用超声的力学效应除了实现弹性成像以外，还可以实现声操控和定点给药。利用超声场驱动血管内药物颗粒定点聚集并在指定病灶区释放药物，再利用超声辐射力同时结合微泡的空化效应可以

将积聚在病灶部位的载药超声微泡击碎,释放其中的治疗性药物,达到定点给药治疗的目的。该技术有望极大地提高目标部位药物浓度,降低药物对全身正常组织的毒副作用,提升治疗效果。近年来,研究人员利用声辐射力还实现了神经调控。通过不同的强度、频率、脉冲重复频率、脉冲宽度、持续时间使刺激部位的中枢神经产生刺激或抑制效应,对神经功能产生双向调节的可逆性变化。超声的热效应是由于超声波在组织中传播时,散射的能量会被周围的组织吸收,从而导致组织温度的升高。利用超声的热效应可以实现肿瘤的热消融。通过高强度聚焦超声(HIFU)将能量聚集在靶区内,并在靶区形成瞬态高温效应,可在短时间内使靶区内温度升高至 $65^{\circ}\text{C}\sim 100^{\circ}\text{C}$ ,从而杀灭肿瘤细胞,引起肿瘤组织的凝固性坏死。研究表明,HIFU治疗可以明显增强宿主细胞免疫功能,同时使机体产生特异性抗肿瘤的免疫作用。有关超声特性在生物组织中的更多应用有待进一步发掘,而信息技术将在发掘过程中发挥重要作用。

### 3 总结与展望

生物组织中隐含了大量与其生理病理相关的信息,如粘弹信息、电导率信息等。超声波在生物组织中的传播规律比较复杂,通过与组织的相互作用,超声回波信号中携带着丰富的表征组织生物学特性的信息。利用信息技术对超声与人体组织相互作用的物理机制进行深入挖掘,有望提取出更多、更准确和更有价值的医疗诊断信息,最终为疾病的治疗和诊断提供科学依据。

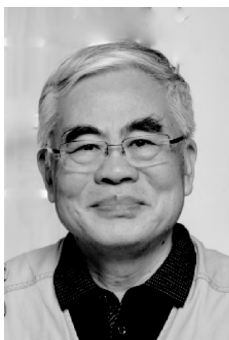
#### 参 考 文 献

- [1] 陈思平. 10 000 个科学难题 信息科学卷 [M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- [2] Garra BS, Cespedes EI, Ophir J, et al. Elastography of breast lesions: initial clinical results [J]. Radiology, 1997, 202(1): 79-86.
- [3] Ophir J, Céspedes I, Ponnekanti H, et al. Elastography: A quantitative method for imaging the elasticity of biological tissues [J]. Ultrasonic Imaging, 1991, 13(2): 111-134.
- [4] Shiina T, Nightingale KR, Palmeri ML, et al. WFUMB guidelines and recommendations for clinical use of ultrasound elastography: Part 1: Basic principles and terminology. Ultrasound in Medicine and Biology, 2015, 41(5): 1126-1147.
- [5] Piscaglia F, Marinelli S, Bota S, et al. The role of ultrasound elastographic techniques in chronic liver disease: current status and future perspectives [J]. European Journal of Radiology, 2014, 83(3):450-415.
- [6] Zheng Y, Yao A, Chen S, et al. Ultrasound vibrometry using orthogonal- frequency-based vibration pulses. IEEE transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2013, 60(11): 2359-2370.
- [7] Chen X, Shen Y, Zheng Y, et al. Quantification of liver viscoelasticity with acoustic radiation force: a study of hepatic fibrosis in a rat model. Ultrasound in Medicine and Biology, 2013, 39(11): 2091-2102.
- [8] 杨挺青. 黏弹性理论与应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [9] Fung Y. Biomechanics: mechanical properties of living tissues [M]. Springer, 1993.

- [10] Atay SM, Kroenke CD, Sabet A, et al. Measurement of the Dynamic Shear Modulus of Mouse Brain Tissue In Vivo By Magnetic Resonance Elastography [J]. Journal of Biomechanical Engineering, 2008, 130(2):021013.
- [11] Ocal S, Ozcan MU, Basdogan I, et al. Effect of preservation period on the viscoelastic material properties of soft tissues with implications for liver transplantation [J]. Journal of Biomechanical Engineering, 2010, 132(10):101007.
- [12] Freed AD, Diethelm K. Fractional calculus in biomechanics: a 3D viscoelastic model using regularized fractional derivative kernels with application to the human calcaneal fat pad [J]. Biomechanics and Modeling in Mechanobiology, 2006, 5(4):203-215.
- [13] Joines WT, Zhang Y, Li C, et al. The measured electrical properties of normal and malignant human tissues from 50 to 900 MHz [J]. Medical Physics, 1994, 21(4):547.
- [14] 刘国强. 磁声成像技术(上下册)[M]. 北京: 科学出版社, 2016.
- [15] Li Y, Liu G, Xia H, et al. Numerical Simulations and Experimental Study of Magneto-Acousto-Electrical Tomography With Plane Transducer[J]. IEEE Transactions on Magnetics, PP(99):1-4.
- [16] Li Y, Liu G, Xia H, et al. Numerical Simulations and Experimental Study of Magneto-Acousto-Electrical Tomography With Plane Transducer [J]. IEEE Transactions on Magnetics, PP(99):1-4.
- [17] O'Donnell M. Coded excitation system for improving the penetration of real-time phased-array imaging systems [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 1992, 39(3):341-351.
- [18] Walker WF, Trahey GE. A fundamental limit on delay estimation using partially correlated speckle signals [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control, 2002, 42(2):301-308.
- [19] Song P, Urban MW, Manduca A, et al. Coded excitation plane wave imaging for shear wave motion detection [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control, 2015, 62(7):1356-1372.
- [20] Sandrin L, Tanter M, Gennisson J, et al. Shear elasticity probe for soft tissues with 1-D transient elastography [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control, 2002, 49(4):436-446.
- [21] He XN, Diao XF, Lin HM, et al. Improved shear wave motion detection using coded excitation for transient elastography [J]. Scientific Reports, 2017, 7:44483.
- [22] 王志刚. 超声分子影像学 [M]. 北京: 科学出版社, 2016.
- [23] Beccaria K, Canney M, Goldwirt L, et al. Opening of the blood-brain barrier with an unfocused ultrasound device in rabbits. Journal of Neurosurgery, 2013, 119(4): 887-98.
- [24] Choi JJ, Pernot M, Small SA, et al. Noninvasive, transcranial and localized opening of the blood-brain barrier using focused ultrasound in mice. Ultrasound in Medicine and Biology, 2007, 33(1): 95-104.
- [25] Hynynen K, McDannold N, Vykhodtseva N, et al. Noninvasive MR imaging-guided focal opening of the blood-brain barrier in rabbits. Radiology, 2001, 220(3): 640-646.
- [26] Aryal M, Arvanitis CD, Alexander PM, et al. Ultrasound-mediated blood-brain barrier disruption for

- targeted drug delivery in the central nervous system. *Advanced Drug Delivery Reviews*, 2014, 72: 94-109.
- [27] Treat LH, Mcdannold N, Zhang Y, et al. Improved Anti-Tumor Effect of Liposomal Doxorubicin after Targeted Blood-Brain Barrier Disruption by Mri-Guided Focused Ultrasound in Rat Glioma. *Ultrasound in Medicine and Biology*, 2012, 38(10): 1716-1725.
- [28] Yang FY, Wong TT, Teng MC, et al. Focused ultrasound and interleukin-4 receptor-targeted liposomal doxorubicin for enhanced targeted drug delivery and antitumor effect in glioblastoma multiforme. *Journal of Controlled Release*, 2012, 160(3): 652-658.
- [29] Shen Y, Guo J, Chen G, et al. Delivery of Liposomes with Different Sizes to Mice Brain after Sonication by Focused Ultrasound in the Presence of Microbubbles [J]. *Ultrasound in Medicine and Biology*, 2016, 42(7):1499-1511.
- [30] Shen Y, Pi Z, Yan F, et al. Enhanced delivery of paclitaxel liposomes using focused ultrasound with microbubbles for treating nude mice bearing intracranial glioblastoma xenografts[J]. *International Journal of Nanomedicine*, 2017, 12:5613-5629.

### 作者简介



陈思平，深圳大学生物医学工程学院教授、博导。曾任安科公司总工、深圳大学副校长。长期从事生物医学工程研究，医学超声工程开发和致力于科技成果产业化。主持和完成我国第一台彩超的研制和投产（1989年）、“九五”攻关项目、“十五”国家攻关项目及国家自然科学基金重点项目、国家重大仪器专项。发表SCI等学术论文100余篇，申请和获准发明专利20多项、合著3部。获得国家科学技术进步二等奖2项、国家突出贡献中青年专家、享受国务院特殊津贴专家、广东省科技突出贡献奖等奖励十余项。创办深圳大学医学院、生物医学工程学科，以及组建广东省生物医学信息检测与超声成像重点实验室、医学超声关键技术国家工程实验室等科研平台。兼任国家科技部数字诊疗重点专项专家、973领域专家、全国医用电器标准化技术委员会副主任委员、中国超声医学工程学会仪器工程专业委员会主任委员等职。



## 信息化在重大科研仪器研制项目研究与管理中的应用

陆亚林<sup>\*1,2</sup> 杨萌萌<sup>1</sup> 江芳<sup>1</sup> 傅正平<sup>2</sup> 何志刚<sup>1</sup> 刘功发<sup>1</sup>

(1. 中国科学技术大学国家同步辐射实验室; 2. 中国科学技术大学合肥微尺度物质科学国家实验室(筹))

### 摘要

重大科研仪器对现代科学技术的发展具有不可替代的推动作用,但重大科研仪器的研制是个复杂艰巨的任务。与一般的科研类项目不同,重大科研仪器的研制除了必须发展大量相关的理论和技术之外,还对项目的管理有更高的要求。本文将国家自然科学基金委重大科研仪器研制项目“太赫兹近场高通量材料物性测试系统”为例,从项目思想来源、仪器研制过程、仪器系统集成、项目实施管理和仪器建成后的开放共享信息化五个角度阐述科研信息化在重大科研仪器项目中的应用,并就科研信息化对重大科研仪器研制项目的重要性和必要性提出自己的见解。

### 关键词

信息化;重大科研仪器研制;实施管理

### Abstract

The development of major scientific instruments has indispensable impacts on the modern science and technology, however, it is a complex and difficult mission. Comparing to common scientific projects, the development of major scientific instruments not only requires progresses in relevant theories and technologies, but also requires efficient projects management. In this paper, quoting the Special Fund for Research on National Major Research Instruments as an example, we will discuss the applications of the information for the program of developing major scientific instruments, and comment on their importance and necessity. Our discussion and comments are made on the basis of following five parts, including sources of project ideas, the process of developing instruments, the integration of instrument systems, the implementation of the projects management, and sharing information after the completion of instruments.

### Keywords

Information; Major Scientific Instruments; Management

## 1 引言

科研信息化(e-Science)的概念是20世纪末在英国首先提出的,其意义在提出伊始就被解释为“在重要的科学领域中的全球性合作,以及使这种合作成为可能的下一代基础设施”<sup>[1, 2]</sup>。英国国家e-Science中心给其下的正式定义是:e-Science是指大规模的科学所日益增加的分布式全球协作,这种科学协作的一个典型特征是科学家能进入大规模大容量的数据库和数字资源网络以及高性能的可视系统<sup>[3]</sup>。

科研信息化的实质是通过信息化手段促进科学研究,包括采用新型信息技术、建设新型信息设施、在这种基础设施和支持技术基础上进行的科学研究以及在这种环境中中国科学院家的活动<sup>[2]</sup>。开放式研究、资源共享和协作式研究是科研信息化的特点。它的基础设施包括各种计算资源、数据资源、网络通信资源以及科学仪器仪表设备等。互联网、数字图书馆、超级计算、数据库、协同工作软件、视频会议以及传感器技术等都属于科研信息化的范畴。

科研信息化使得全球性、跨学科、大规模科研合作以及跨越时间、空间、物理障碍的资源共享与协同工作成为可能,这将改变科学家们从事科研活动的方法和模式。科研信息化能极大地促进交流合作,推动科学研究的发展,变革科研组织与活动模式并推动科技转型,科研信息化正在引发 21 世纪科学与工程变革。

国家重大科研仪器研制项目面向科学前沿和国家需求,以科学目标为导向,加强顶层设计、明确重点发展方向,鼓励和培育具有原创性思想的探索性科研仪器研制,着力支持原创性重大科研仪器设备研制,为科学研究提供更新颖的手段和工具,以全面提升我国的原始创新能力。

重大科研仪器研制项目具有强调国家目标、突出集成创新、兼顾软硬开发、重视用户参与、组织管理复杂和具有较高风险等基本特征<sup>[4]</sup>。重大科研仪器研制项目的这些基本特征决定了科研信息化对重大科研仪器研制项目的重要性和必要性,其应用也将贯穿在项目从立项到验收的各阶段。

## 2 信息化是重大科研仪器研制的重要思想来源

重大科研仪器研制的思想一方面来源于申请者已有的科研实践,另一方面来源于广泛获取其他的科研信息。以国家重大科研仪器研制项目“太赫兹近场高通量材料物性测试系统”为例,项目负责人陆亚林教授在 1997 年发表在《Science》期刊的论文<sup>[5]</sup>中提出了一套微波近场成像系统,可以将成像空间分辨率提高到所用微波波长的百万分之一( $10^{-6}\lambda$ ),这成为“太赫兹近场高通量材料物性测试系统”项目最主要的思想来源。在此基础上,通过对大量科研信息的分析,陆亚林教授敏锐地捕捉到太赫兹频段对功能材料中载流子集体行为的探测具有不可替代性,同时当前的材料基因组工程实施过程中,功能材料的高通量表征技术还亟待发展,而多物理场条件(温度、磁场、电场、光场)是调控并揭示功能材料物性和机制的必要手段。基于上述信息,陆亚林教授带领团队凝练出项目待研仪器的设计目标,以及要实现这些设计目标所需要的技术框架。同样,在项目组已有技术基础上,通过大量吸纳相关领域的科技信息,发展了多项创新性技术,包括紧凑型自由电子激光太赫兹光源、双模式(高精度和大范围)扫描探针镜体、大口径矢量强磁体、高品质光路等,在这些创新性技术基础之上,形成了极具原创性的重大科研仪器研制构想。

由此可见,重大科研仪器研制的思想提出与科研信息化中的数据资源密不可分。此外,信息的提取、分析、整合和再加工还有助于进一步提升重大科研仪器研制项目的科研意义。

### 3 重大科研仪器研制的创制过程需要信息化

#### 3.1 信息化是集成创新的基本支撑条件

相对于其他科研项目，重大科研仪器研制项目研究的问题复杂化程度更高，更依赖不同学科、不同领域的交叉融合和综合集成，需要充分整合多学科领域力量，也需要利用多种新技术。因此，加强多部门的协同攻关和集成创新是重大科学仪器研发项目成功的关键因素。

以“太赫兹近场高通量材料物性测试系统”项目为例，该测试系统面向的是功能材料研究最前沿的领域，所以需要紧跟该领域的发展。另外，该设备需要光、机、电、低温、磁性、自动控制、精密加工等技术，这其中某些领域的发展很快，新技术不断涌现。因此，需要整合各学科领域的力量并充分利用网络信息，收集并共同消化大量相关的新技术信息。因此，加强多学科领域间的信息共享，促进各领域科学家间的密切合作交流以及集成多种新技术是项目成功的关键因素，而这种大范围高交互程度的信息共享、合作交流极大程度上依赖于互联网技术。

“太赫兹近场高通量材料物性测试系统”项目组构建了多种依托于互联网的讨论组和讨论群，主要包括基于电子邮件和基于社交媒体两种形式。前者的主要组织形式是邮件组，后者的主要组织形式包括 QQ 群、QQ 讨论组和微信群等。

其中，邮件组多用于较正式的讨论，以便保留供日后追溯查看的资料；同时，基于 webmail 的会议发起也正逐渐投入使用。图 1 展示了基于 webmail 的会议发起，可以看出，除了常规的会议时间、地点和议程通知之外，还设置了提醒和重复的功能，有助于帮助项目成员备忘。

**新建事件**

**1 标题和时间**

标题: 太赫兹近场高通量材料物性测试系统项目例会

时间: 2017-12-25 8:30 到 2017-12-25 11:30 ☐ 全天事件

**2 活动详情** 安排时间

地点: 3号楼229会议室

说明: 计划议程:  
1. 分总体工作汇报  
2. 集体讨论

提醒: ☒ 电子邮件 提醒 10  提醒

状态: 每周重复

重复时间: ☐ 周一 ☐ 周二 ☒ 周三 ☐ 周四 ☐ 周五 ☐ 周六 ☐ 周日

重复类型: 重复至

重复至: 2021年12月31日 星期五

重复摘要: 每周重复 周三重复至 2021年12月31日 星期五

**邀请对象**

<input checked="" type="checkbox"/> 接受	0	<input checked="" type="checkbox"/> 待定	0
<input checked="" type="checkbox"/> 拒绝	0	<input checked="" type="checkbox"/> 待回复	0

共邀请: 2人, 会议室: 0间

图 1 基于 webmail 的会议发起

基于社交媒体的讨论群则多用于实时讨论信息，包括文献分享、需求讨论。基于社交媒体的讨论群组在多元讨论、及时反馈等方面具有邮件组无法比拟的优势，大大提高了项目组成员间的信息交互程度，也有助于项目组凝聚力的提高。图2展示了基于社交软件QQ的讨论组。



图2 基于社交软件QQ的讨论组

通过依托于互联网的讨论组和讨论群，项目成员间可以及时获得别人研究的成果，还能及时把自己研究的成果告知别人，大幅提升了项目组的信息传递效率。

### 3.2 信息化有助于提高待研仪器实用性

重大科研仪器研制项目不仅要“做”，更要重视“用”<sup>[6]</sup>。“做”是指项目组如何按照立项设想或计划完成仪器设备建设，“用”是指项目完成后仪器设备如何发挥作用。在“太赫兹近场高通量材料物性测试系统”的项目启动会上，专家组的多位专家均提到了应“充分考虑仪器的实用性”，而提升仪器实用性的最直接方式就是让仪器科学目标面向的未来用户直接参与到项目建设的整个过程，以将用户需求直接反映到仪器的各个方面。

在“太赫兹近场高通量材料物性测试系统”项目执行过程中，项目组始终坚持让仪器科学目标面向的未来用户直接参与到项目建设的整个过程，以将用户需求直接反映到仪器的各个方面。由于仪器科学目标面向的未来用户存在于多个领域和不同地域，因此，集中各领域的未来用户于同一时间和空间参与项目执行过程并不现实。实际上，用户需求的反馈以及研讨基本是通过信息化的途径完成的，如借由互联网。

为此，“太赫兹近场高通量材料物性测试系统”项目专业地划分出“科学研究与技术发展分总体”，负责与待研仪器的潜在用户对接。分总体成员多次以邮件征集以及视频讨论等形式向潜在用户征求需求，组织设备研发人员与科学研究人员充分沟通，及时

整合用户反馈的需求并以此为导向指导项目执行过程,适当调整项目方案,以期未来仪器研制成功后最大限度地提升仪器的实用性。

### 3.3 信息化是有效降低项目风险的可行方案

重大科研仪器研制项目涉及的都是各学科最前沿领域的知识与技能,由于技术的不确定性所带来的风险更加突出。在重大科研仪器研制项目执行过程中,做好风险防控对于项目的顺利完成尤为重要。通过充分运用预组装以及仿真模拟等方式有利于充分降低风险,而仿真模拟过程中涉及的数据获取、数据处理、大规模计算等也同样隶属于科研信息化的范畴。

在“太赫兹近场高通量材料物性测试系统”项目执行过程中,首要目标是验证物理设计方案的合理性——在没有完整的技术方案,更没有原型样机的前提下,仿真是验证方案合理性的唯一途径。项目进行了大量的仿真模拟工作,以此为依据指导技术方案的设计。图3和图4是“太赫兹近场高通量材料物性测试系统”项目中某关键技术设计的方案仿真模拟示意图。

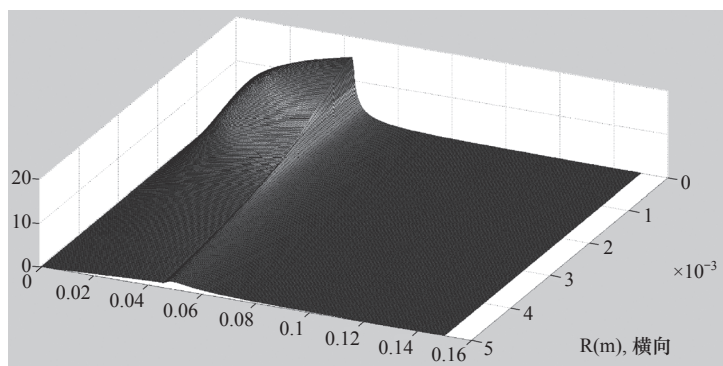


图3 “太赫兹近场高通量材料物性测试系统”项目某仿真模拟示意图(一)

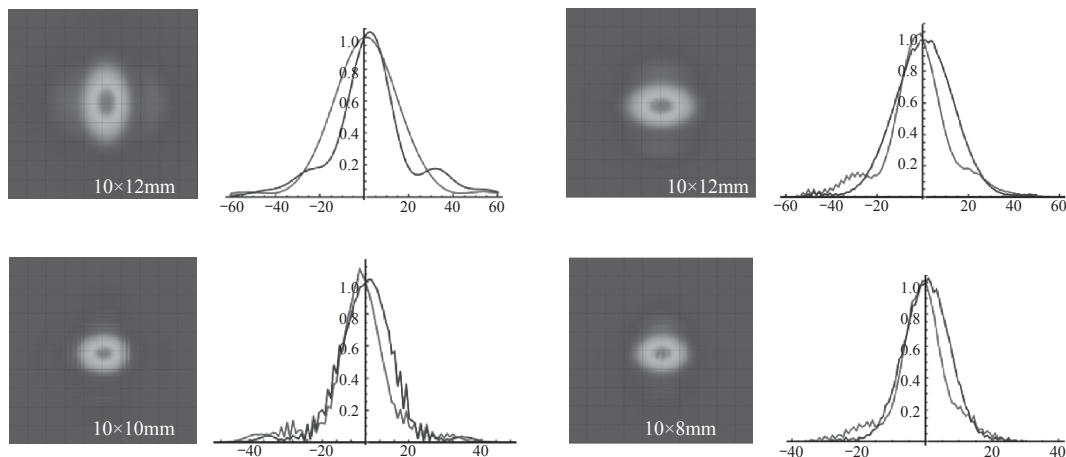


图4 “太赫兹近场高通量材料物性测试系统”项目某仿真模拟示意图(二)



## 4 待研仪器系统的信息化

从创新链来看，一般的科技创新链为：基础研究—应用研究—产品开发—市场用户；而科学仪器设备创新链为：基础研究—应用研究—产品开发—应用开发—市场用户。相比于一般的科技创新，科学仪器设备创新多了应用开发的环节。重大科研仪器研制项目不仅包括科学仪器设备的研制，还包括与之相关的数据库、软件和相关方法的开发以及控制系统的基础，这是科研仪器设备创新特有的要求<sup>[4]</sup>。因此，重大科研仪器研制项目不仅研制过程离不开科研信息化，待研仪器本身也要求极高的信息化程度。

以作者承担的“太赫兹近场高通量材料物性测试系统”为例，该测试系统不仅包括测试平台以及测试环境的构建，还涉及多种设备的集成和多种类型的接口；除此之外，大量复杂数据的采集与分析也是测试系统必不可少的功能。因此，开发相关的软件和控制对于项目圆满完成必不可少，而这与科研信息化中的数据库、通信技术等技术密不可分。

图5是“太赫兹近场高通量材料物性测试系统”项目初步构建的仪器中央控制硬件结构示意图，包括管理层、数据通信层和前端控制器层。其中，管理层包括监控计算机、虚拟化服务器平台等，用于实现分布式控制；数据通信层用于管理层和前端控制器层间的连接，以及测量数据的采集获取；前端控制器层用于各分总体的控制。

仪器中央控制的软件系统采用基于EPICS的控制系统，即“实验物理及工业控制系统”（Experimental Physics and Industrial Control System），是20世纪90年代初由美国洛斯阿拉莫斯国家实验室（LANL）和阿贡国家实验室（ANL）等联合开发的大型控制软件系统。基于分布式标准的EPICS结构包括两部分：IOC层和OPI层。IOC层又可以细分为6层：通道访问（CA）服务器接口、数据库访问接口、动态数据库、记录支持模块、设备支持模块、设备驱动器。OPI层可以细分为两层：通道访问（CA）客户接口和应用软件。EPICS软件系统中的两个基本机制就是通道访问和分布式动态数据库。

显然，为了提高系统的可用性及可维护性，重大科研仪器研制项目的系统集成过程需要大量采用各种信息化技术。

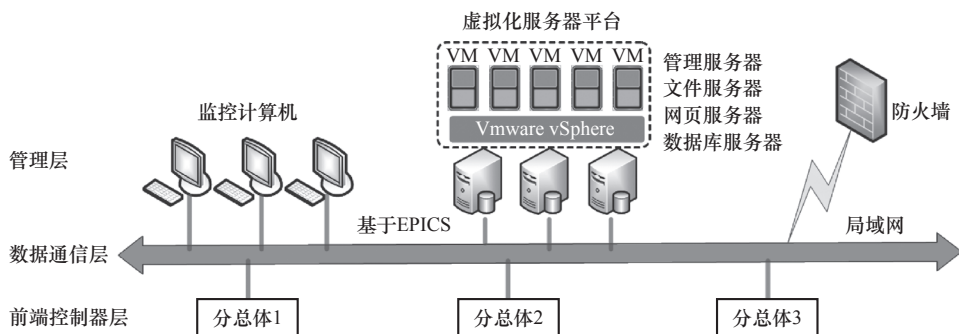


图5 “太赫兹近场高通量材料物性测试系统”项目仪器中央控制硬件结构示意图

## 5 信息化是完善项目组织管理的有效手段

重大科研仪器研制项目是一个反复尝试的过程，需要不断汲取前一阶段研究的经验和教训，在反馈和交互中推进研发活动<sup>[6]</sup>。重大科学仪器设备研发项目的组织管理涉及项目组织和实施过程中与各参与方直接相关的一系列规则、规范、程序，需要高效地组织协调，才能实现资源的有效配置。通过信息化协同管理可以有效提高组织协调能力，有助于完善项目组织管理。

科研项目的组织管理主要包括人员管理、组织管理、过程管理、经费管理、成果管理、信息发布等<sup>[7]</sup>。以下对于“太赫兹近场高通量材料物性测试系统”项目执行过程中信息化在上述六方面的应用分别进行阐述。

### 5.1 基于互联网的人才引进

人才资源是社会活动的核心。引进高水平科研人才对于有效推进项目进展，填补项目若干领域的人才空缺具有极其重要的作用。“太赫兹近场高通量材料物性测试系统”项目极其注重人才引进工作，充分利用各种社交媒体和门户网站，如学术桥、高校人才网等专业学术人才招聘网站及相关公众号，发布条件明确的招聘信息，以期引进对口的专业人才和紧缺人才。图6为项目组在高校人才网上发布的项目招聘信息。

**中国科学技术大学太赫兹项目2017年人才需求计划**

发布时间: 2017-03-04      截止日期: 详见正文  
所属省份: 安徽      工作地点: 合肥  
高校分类: 安徽高校      招聘人数: 若干  
报名方式: 详见正文  
需求学科 (供参考): 电子科技 光学工程 机械工程 机械工程 (车辆工程类) 计算机与软件类 控制科学与工程 物理学

中国科学技术大学是中国科学院所属的一所以前沿科学和高新技术为主、兼有特色管理和人文社科的综合性全国重点大学。

国家重大科研仪器研制项目  
“太赫兹近场高通量材料物性测试系统”  
人才需求表

分总体/部门名称: 复合光源与光源负责人: 何志刚

岗位名称	岗位职责	招聘条件	最晚到岗时间
博士后、 特任副研究员	飞秒激光时域整形技术研究; 超快激光脉冲同步技术研究; 激光脉冲测量技术开发; 基于超短激光的太赫兹源设计; 激光传输光路设计。	具有光学及相关专业博士学位; 有飞秒激光器设计及使用经验者优先考虑; 特任副研究员应聘者科研能力上需达到我校副研究员平均水平。	2017年9月
博士后、 特任副研究员	THz光性能测量	具有THz光学等相关专业背景的博士学位; 具有相关研究背景者优先; 特任副研究员应聘者科研能力上需达到我校副研究员平均水平。	2017年9月

**推荐信息**

- 厦门工学院2017年诚聘海外优秀人...
- 三明学院2015-2017年引进高层次人才...
- 三亚城市职业学院2017年招聘公告
- 华南理工大学广东首批科学与工程...
- 三亚城市职业学院2017年辅导员招...
- 湖南科技学院2017年高层次人才引...
- 青岛理工大学琴岛学院2017年商务...
- 上海外国语大学2017年各类人才招...
- 中国科学技术大学太赫兹项目2017...
- 安徽新华学院2017年非教师岗位招...
- 广东省石油与精细化工研究院2017...
- 广东省石油与精细化工研究院2017...
- 广东海洋大学2017年公开招聘2...
- 江西农业大学2017年公开招聘
- 安徽工业大学2017年度部分岗位

**热点信息**

- 国家林业局在京直属单位2017年
- 杭州市教育局所属事业单位2017 官方招聘
- 黄河科技学院2017年辅导员招聘
- 华夏幸福2017年春季校园招聘
- 强生2017年春季校园招聘岗位
- 安徽工业大学2017年度高层次人才...
- 武汉交通职业学院2017年辅导员招...
- 安徽建筑大学2017年招聘17名辅导...
- 宁波职业技术学院2017年公开招聘...
- 华夏幸福基业股份有限公司2017年3...
- 广东海洋大学2017年公开招聘244名...
- 中共南京市委党校2017年公开招聘...

图6 高校人才网发布的“太赫兹近场高通量材料物性测试系统”部分招聘信息

同时，为了加速人才引进过程，在人才引进的面试环节项目组充分借助互联网，灵活采用网络面试等形式，对不便参加传统面试的应聘人员充分提供便利，也大大加速了人才引进过程。

5.2 采用信息化手段提升系统协调效率

在项目执行过程中，信息化手段的应用大大提升了系统协调的效率。例如，在进行任务分配的过程中，任务分配者和任务承担者之间采用邮件、短信、电话或其他基于社交媒体的沟通方式充分沟通任务内容，沟通达成一致后形成正式的任务分配通知单，尽可能避免后续更改的可能性。

5.3 基于互联网和数据库的过程管理

项目执行过程的过程文件管理对于项目推进有着十分重要的意义，尤其对于重大科研仪器项目，涉及的过程文件数量巨大——如果过程文件管理混乱，对于项目验收以及之后的推广应用都将带来极大的不便。按照规范建立从设计图纸、材料选择、部件加工工艺到装配等各环节完整的技术档案，有助于保证技术固化，便于传承与发展。此外，仪器在研制过程中，建立涉及人事、采购、进度控制、部门间沟通以及研制过程中遇到的问题和解决方案等规章制度和文档规范，也便于项目总结和他人借鉴<sup>[6]</sup>。

“太赫兹近场高通量材料物性测试系统”执行过程中，建立了完善的文档规范，这些文档规范均以电子文档的形式发送至相关责任人的邮箱，避免了囤积大量的空白纸质文档，确保相关文档随用随打。项目还建立了档案数据库，并不断更新维护，这不但有利于过程文件的管理，也有利于将来档案验收工作的顺利展开以及作为日后追溯的依据。图7为项目电子档案案卷目录示意图。

国家重大科研仪器研制项目“太赫兹近场高通量材料物性测试系统”档案案卷目录										
序号	档号	案 卷 名 称			件数	页数	起止日期	保管期限	密级	备注
		项目名称	单项名称	案卷题名						
1	NFTHZ-ZG01-01	综合管理	立项文件	国家重大科研仪器研制项目“太赫兹近场高通量材料物性测试系统”项目申请书	1	1		永久		
2	NFTHZ-ZG01-02	综合管理	立项文件	国家重大科研仪器研制项目“太赫兹近场高通量材料物性测试系统”项目现场考察	?	1		永久		
3	NFTHZ-ZG01-03	综合管理	立项文件	国家重大科研仪器研制项目“太赫兹近场高通量材料物性测试系统”批准通知书及项目计划书	2	2		永久		
4	NFTHZ-ZG01-04	综合管理	立项文件	国家重大科研仪器研制项目“太赫兹近场高通量材料物性测试系统”项目启动会会议材料	4	4		永久		
17	NFTHZ-ZG02-01	综合管理	管理文件	关于成立项目工程指挥部的通知、工程指挥部和分总体负责人的职责通知、采购流程、文档规范、工程规章制度的通知、档案管理办法的通知等材料	9	9		永久		

图7 “太赫兹近场高通量材料物性测试系统”项目电子档案案卷目录示意图

此外，为了项目文件安全存储的考虑，避免意外的数据丢失，项目组还采用了云存储的方式，在云端备份了项目重要文档，给项目文件带上“双保险”。

5.4 采用信息化手段监督规范经费使用

经费使用历来是科研项目受关注的重点，而在当前国家不断给科研经费使用松绑的

大环境下，经费使用的自我监督尤为重要。在“太赫兹近场高通量材料物性测试系统”项目执行过程中，项目组除了规范经费使用流程之外，还特别建立了项目收支自查表，如图 8 所示，以项目计划书中的预算申报表为对比依据，对于采购日期、支出金额、责任人、采购型号等进行详细记录。

序号	设备名称	设备分类	预算单价 (万元/台件)	数量 (台件)	预算金额 (万元)	购置设备 型号	购置设备生 产国别与地 区	采购、加工申 请提交日期	实际单价 (万元/台件)	数量 (台件)	实际金额 (万元)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)=(3)×(4)	(6)	(7)					
1	太赫兹近场高通量材料物性测试系统	购置	100.00	1	100.00						
2	太赫兹近场高通量材料物性测试系统	购置	100.00	1	100.00						
3	太赫兹近场高通量材料物性测试系统	购置	100.00	1	100.00						
4	太赫兹近场高通量材料物性测试系统	购置	100.00	1	100.00						
5	太赫兹近场高通量材料物性测试系统	购置	100.00	4	400.00						
6	太赫兹近场高通量材料物性测试系统	购置	100.00	1	100.00						
7	太赫兹近场高通量材料物性测试系统	购置	100.00	1	100.00						
8	太赫兹近场高通量材料物性测试系统	购置	100.00	4	400.00						
9	太赫兹近场高通量材料物性测试系统	购置	100.00	6	600.00						
10	太赫兹近场高通量材料物性测试系统	试制	100.00	1	100.00						
11	太赫兹近场高通量材料物性测试系统	试制	100.00	1	100.00						

图 8 “太赫兹近场高通量材料物性测试系统”项目经费使用自查表示意图

除此之外，每半年与项目依托单位财务系统中的数据进行比对，对差值项进行自查自纠，确保经费使用合法合规。

## 5.5 建立数据库，全面管理科研成果

科研成果的管理对于项目实施也非常重要，同时对于各类总结、年报的编写也可以极为便利地提供支撑数据。针对本项目，我们建立数据库对发表文章、申请专利等情况进行全面记录（见图 9），同时，利用佰腾等专利检索网站提供的专利管理功能进行知识产权维护。

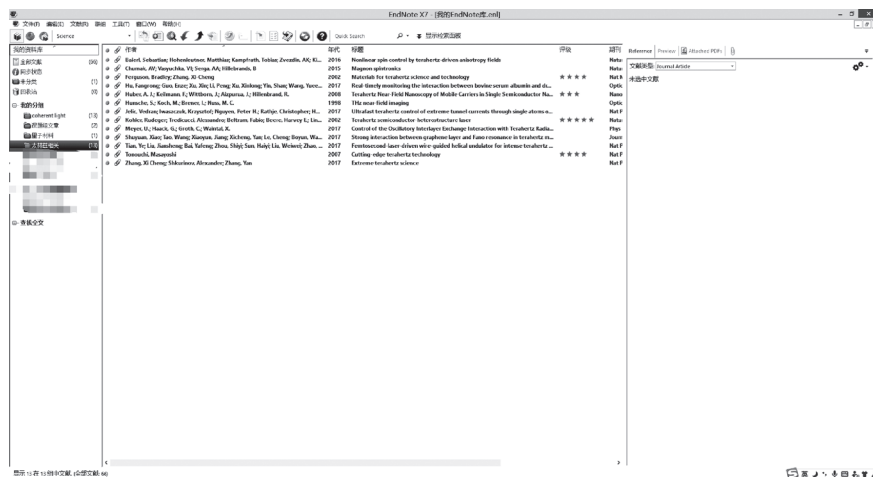


图 9 “太赫兹近场高通量材料物性测试系统”文献追踪数据库示意图

此外，项目组还利用 endnote 等文献管理软件，结合多种文献检索引擎，建立了文献追踪数据库，密切关注与项目待研仪器相关的文献，并据此不断优化仪器设计方案，

确保仪器设计面向前沿的科学需求。

### 5.6 建立项目门户网站，及时发布信息

项目门户网站是项目对外的窗口，是项目信息披露和交流的平台。“太赫兹近场高通量材料物性测试系统”项目门户网站（筹备中，已发布设计需求）由项目简介、研究动态、研究成果、招聘信息等组成，栏目和栏目内容可以在网上动态更新维护。

此外，“太赫兹近场高通量材料物性测试系统”项目注重新闻宣传，一旦有重要动态，如启动会、研讨会或重大成果等，都会在相关网站（如项目依托单位的门户网站等）上发布相关信息，持续引起关注并由此吸引优秀人才，而优秀人才的到来又可以促进项目顺利推进，由此形成良好的循环（见图 10）。



图 10 “太赫兹近场高通量材料物性测试系统”项目新闻

## 6 重大科研仪器制成后的管理和开放需要信息化

前文提到待研仪器的实用性——待研仪器的实用性还包括研制成功后仪器设备的利用率。仪器利用率的提高有赖于充分的开放共享。信息化的仪器管理平台有助于仪器信息的充分公开，能够有效提高开放共享率。

“太赫兹近场高通量材料物性测试系统”项目完成后，将考虑通过以下几种方式实现开放共享：

### （1）纳入中国科学院仪器设备共享管理平台。

如图 11 所示为中国科学院仪器设备共享管理平台的首页，通过快速预约功能区中区域中心、研究所、仪器大类、仪器中类和仪器小类的选择，可以快速查询意向仪器；在查询结果界面，根据相关仪器的预约状态和预约类型进行预约使用，如图 12 所示。

待研仪器建成后，如纳入该共享管理平台统一管理，将归属于合肥战略能源和物质科学大型仪器区域中心——中国科学技术大学，仪器大类属于室内分析测试设备，如



图 13 所示。同时，通过建立如图 14 所示的仪器设备档案卡，充分明确仪器的应用范围及主要功能（如可测量的特征物性），实现高度专业化、领域针对性强地开放共享。



图 11 中国科学院仪器设备共享管理平台的首页



图 12 中国科学院仪器设备共享管理平台仪器查询结果及预约入口



图 13 建成后的待研仪器在中国科学院仪器设备共享管理平台中的区域、研究所及仪器大类归属示意图



图 14 仪器设备档案卡示例

(2) 建立类似(1)的开放共享平台，自主管理。通过自行搭建类似的仪器设备共享管理平台，并在项目门户网站、相关实验室网站及其他相关网站提供管理平台入口链接。

通过信息化手段，将仪器的开放共享流程管理、开放数据资源管理、成果产出管理纳入其中，并结合科普宣传，提升设施开放共享的公众影响力，挖掘优质资源，培养潜在用户，扩大仪器应用范围，更好地服务于中国科研事业。

## 7 结束语

国家重大科研仪器研制项目从思想来源到创制过程，以及贯穿项目管理的始终，再至仪器的使用和开放共享，都离不开科研信息化。我们应该充分认识国家重大科研仪器研制项目的信息化需求，提高信息化在国家重大科研仪器研制项目实施中的应用，不断创新项目管理模式，加强协调沟通，提高风险防范能力，才能推进重大科研仪器项目的顺利实施，才能真正为提高我国科学仪器设备的自主创新能力做出贡献。

### 参考文献

[1] Taylor J. e-Science definition[J]. Retrieved March, 2002, 28: 2006.

[2] 江绵恒. 科学研究的信息化工具: e-Science[J]. 现代信息技术, 2002(7): 4-11.

[3] 秦长江. E-Science(科研信息化)对现代科学的影响[J]. 科技进步与对策, 2008, 8: 41.

[4] 吴家喜, 于忠庆. 重大科学仪器设备研发项目管理模式探讨[J]. 项目管理技术, 2011, 9(12): 56-60.

[5] Lu Y, Wei T, Duewer F, et al. Nondestructive imaging of dielectric-constant profiles and ferroelectric domains with a scanning-tip microwave near-field microscope[J]. Science, 1997, 276(5321): 2004-2006.

[6] 白坤朝, 汲培文, 张守著. 国家重大科研仪器研制项目的管理思考[J]. 中国科学基金, 2017(4): 380-383.

[7] 王瑜. 基于网络的高校科研信息化管理[J]. 技术与创新管理, 2007, 28(2): 34-36.

## 作者简介



陆亚林，中国科学技术大学教授，国家同步辐射实验室主任。2008 年国家首批“千人计划”国家特聘专家、2006 年国家自然科学一等奖获得者。主要研究领域为量子功能材料、光子科学及先进谱学技术，已在 Science、Nature 子刊等杂志发表 260 多篇高质量论文，接受了 90 多次邀请报告和大会报告，编辑 5 本专辑专著，申请及拥有近 50 项中国、美国发明专利。担任科技部“大科学装置前沿研究”重点专项指南编写组专家和专项总体组专家、中国科学院重大科技基础设施未来发展战略规划研究委员会专家、中国物理学会和硅酸盐学会理事，十余家国内外学术期刊的副主编和编委，第三、第四届香港求是科技基金会评审专家。担任国家重大科学仪器专项“太赫兹近场高通量材料物性测试系统”和“新一代高衬度低剂量 X 射线相位衬度 CT 装置”，科技部国家重大科学研究计划，中国科学院依托大科学装置前沿研究重大项目等负责人和首席科学家等。

## “中国教育和科研计算机网”发展现状与展望

刘 莹

(CERNET 网络中心)

### 摘 要

中国教育和科研计算机网 CERNET 是我国第一个全国范围的学术性主干网, 已经成为支持我国高校教育和科研事业发展的公共基础设施的重要组成部分; 中国下一代互联网示范工程 CNGI 示范网络核心网 CNGI-CERNET2/6IX 是迄今为止世界上规模最大的纯 IPv6 下一代互联网主干网, 是我国推进下一代互联网发展战略、占领国际科技竞争战略制高点的基础设施科技创新重要试验平台。本文简述了 CERNET 和 CNGI-CERNET2 在 2015 年以来的进展情况, 以及未来发展展望。

### 关键词

中国教育和科研计算机网; CERNET; CNGI-CERNET2

### Abstract

China Education and Research Network (CERNET) is the first nationwide education and research computer network in China. It has become an important public infrastructure greatly supports China's high education, science and technology development. CNGI-CERNET2/6IX is the largest and only academic one of the network backbones of CNGI. It is the largest pure IPv6 Internet backbone around the world. CNGI-CERNET2 has become the important infrastructure for promoting the Chinese next generation Internet strategy. This paper introduces the development progress of CERNET and CNGI-CERNET2 since 2015.

### Keywords

CERNET; CNGI-CERNET2/6IX; National Research and Education Network

## 1 概述

中国教育和科研计算机网 CERNET 始建于 1994 年, 是由国家投资建设, 教育部负责管理, 清华大学等高校承担建设和运行的全国学术计算机互联网络, 是国内拥有国际出口权的大型互联网主干网之一。经过二十多年的发展, CERNET 联网大学、教育机构、科研单位超过 3 000 个, 用户超过 3 000 万人, 2013 年建成世界先进的 100G CERNET 主干网, CERNET 已发展成为全世界最大的国家学术互联网, 我国教育信息化的重要基础设施和国家信息化基础设施的重要组成部分。

2003 年以来, CERNET 联合清华大学等 100 多所高校参加了由国务院批准、国家发展改革委等八部委联合组织的中国下一代互联网示范工程 CNGI, 建成了 CNGI 中规模最大的核心网 CNGI-CERNET2/6IX, 在下一代互联网关键技术领域取得了若干重要突破, 成为我国研究下一代互联网技术、开发重大应用、推动下一代互联网产业发展的

重要基础试验设施。2016年6月,国家发展改革委批复互联网+重大工程保障支撑类项目“面向教育领域的IPv6示范网络(以下简称CERNET2二期)”立项。

以下从CERNET主干网、CNGI-CERNET2主干网、CERNET/CNGI互联中心三个部分介绍2015年以来CERNET的最近发展状况。

## 2 CERNET 主干网

### 2.1 CERNET 建设和运行情况

通过2013年完成的“211工程”三期CERNET建设项目,目前,CERNET主干网带宽为10~100Gb/s,38个核心节点的互联带宽普遍达到10Gb/s以上,23个核心节点的互联带宽达到100Gb/s,主干网总带宽达到3.15Tb/s以上,每个核心节点交换能力达到21.6Tb/s以上,为高等教育和科技创新提供了良好的信息基础设施。

截至2016年12月,CERNET主干网拥有IPv4地址数约为1459万个(折合227B+9C),EDU.CN域名数为6937个。由于全球IPv4地址耗尽,自2011年起,IPv4地址数量基本没有变化。

2016年CERNET主干网峰值入流量(经38个核心节点流入主干网的合计流量)为270.09Gb/s,主干网峰值出流量(经38个核心节点流出主干网的合计流量)为315.45Gb/s,比2015年增加20%,流量呈逐年递增的趋势(见图1)。

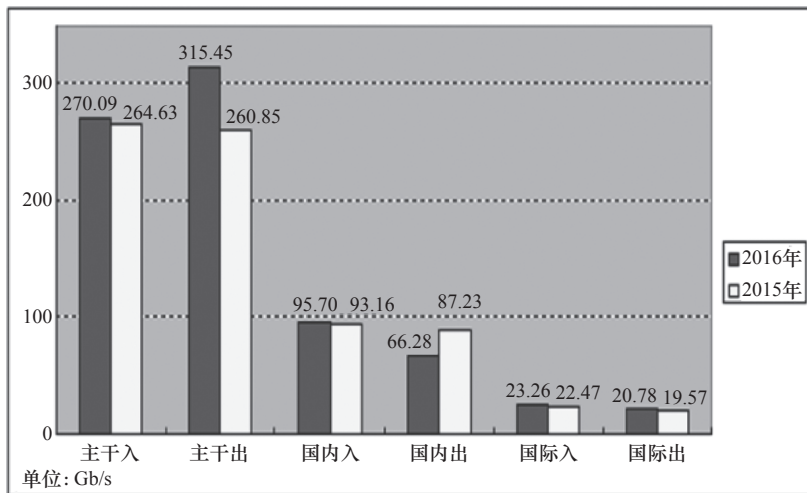


图1 CERNET 主干网流量增长趋势(2015—2016年)

### 2.2 CERNET 主干网接入情况

CERNET主干网38个核心节点建立了高速接入系统,配置具有速率为100Mb/s/1Gb/s/10Gb/s的高速接入能力的设备,具备为2000多所高校提供100Mb/s以上高速接入的能力,并对其中500所高校形成提供10Gb/s接入的能力。目前CERNET共接入超



过 3 000 个单位。

### 2.3 CERNET 支持应用情况

CERNET 建设二十多年来,支持、支撑并推进了大量的网络应用创新服务,建设完成了公共网络应用基本支撑系统建设,包括网络安全服务系统和视频服务系统;面向教育系统为 100 个以上的应用系统提供了数字证书服务;建立了视频服务中心和分布在 38 个核心节点的高清视频会议服务平台及管理系统,为高校之间开展国内和国际学术交流提供了便利的环境,成为学校开展国际合作交流的重要支撑平台。同时,CERNET 完成了重点学科信息服务系统建设及推广完善,在 CERNET 网络中心以及北京、上海、广州建立了分布式信息服务节点;完成了 54 个重点学科信息资源系统建设,形成了覆盖 11 个学科门类的分布式、大容量的高校重点学科信息服务系统。

CERNET 进一步完善了高性能网络管理和安全保障系统建设,通过在 CERNET 网络中心和 38 个核心节点部署分布式网络管理系统、主干网有害行为监测系统、应急响应协同服务系统,对网络运行状态做到“知情可控”,保证 CERNET 主干网的安全、稳定、可靠运行。

CERNET 积极支持国家基础性、前沿性科学研究。2017 年 5 月,无锡超算中心开通了到 CERNET 的 100G 带宽接入,依托 CERNET 的网络优势和技术优势以及无锡超算中心的资源优势,广泛服务于各大教育和科研项目,促进教育领域的研发与创新。由此,通过 CERNET 访问无锡超算中心的用户,将获得最佳的网络体验。

2017 年 11 月,CERNET 与青岛海洋科学与技术国家实验室(以下简称海洋国家实验室)签署了《超算互联网战略合作协议》。CERNET 与海洋国家实验室将共同构建海洋科研高速专用通信网络,并致力于构建国际超算海洋大数据中心,建设全球数据感知范围最广的海洋大数据监测网络。CERNET 将为智能超算与大数据实验室提供 100G 专网,连接国家超算无锡中心、济南中心、国家实验室超算中心的三个超算科学装置,组建一套超算大科学装置群,构成交互性强、覆盖面广、反馈迅速、资讯丰富的超算互联网体系,保障实验室海洋研究大数据的交互与分析处理。

## 3 CNGI-CERNET2 主干网

### 3.1 CNGI-CERNET2 基础网络情况

截至 2016 年 12 月,CNGI-CERNET2 主干网连接分布在 20 个城市的 25 个核心节点,核心节点之间带宽为 2.5G/10Gb/s,核心设备与接入设备之间的连接带宽为 2.5~10Gb/s。主干网总带宽达到 127.5Gb/s。

截至 2016 年 12 月底,CNGI-CERNET2 主干网共有 51 个 IPv6 自治域,IPv6 地址总数达到 19 个 /32;IPv6 地址分配记录 1 100 条(包括 11\*/32,1089\*/48),CNGI-CERNET2 主干网 IPv6 BGP 前缀数量达到了 3.7 万条。CNGI-CERNET2 主干网入流量峰值达到了 59.82Gb/s,出流量峰值达到了 61.28Gb/s。

截至 2016 年, CNGI-CERNET2 主干网络的接入单位有 700 多个。

### 3.2 CERNET2 二期项目建设情况

2016 年 6 月, 国家发展改革委批复了“互联网+”重大工程第二批保障支撑类项目“面向教育领域的 IPv6 示范网络”(CERNET2 二期项目)。项目由 CERNET 网络中心、清华大学等 41 所高校承担建设。

项目的建设目标是, 以已经建成并投入运行十年以上的 CNGI 示范网络核心网 CNGI-CERNET2/6IX 为基础, 建设面向教育领域的大规模 IPv6 下一代互联网示范网络, 主干网核心节点 41 个、带宽达到 100Gb/s, IPv6 用户规模超过 1 000 万; 开展“互联网+”技术试验与应用示范, 为国家实施“互联网+”行动计划提供试验验证平台, 促进我国加快发展 IPv6 下一代互联网、提升国家网络空间安全保障能力, 起到支撑“互联网+”行动计划、超前布局下一代互联网的示范作用。

项目建成后, 主干网核心节点从 26 个增加到 41 个, 覆盖省/自治区/直辖市从 20 个扩展到全国 31 个, 主干带宽从 2.5Gb/s/10Gb/s 升级到 10Gb/s/100Gb/s, 主干网总带宽从 127.5Gb/s 升级到 2 950Gb/s, IPv6 用户规模从 500 万扩展到 1 000 万以上(见表 1)。

表 1 CERNET2 主干网建设前后对比

内 容	项目建设前	项目建设后
网络协议	纯 IPv6	纯 IPv6
核心节点数量	25 个	41 个
核心节点覆盖	20 个省市	31 个省市
主干线路带宽	2.5Gb/s/10Gb/s	10Gb/s/100Gb/s
主干网总带宽	127.5Gb/s	2 950Gb/s
IPv6 用户数量	500 万	1 000 万以上

## 4 CERNET 互联互通状况

### 4.1 CERNET/CNGI 互联中心基本情况

CERNET 负责建设运行 CERNET 北京互联中心(CERNET-IX)、CNGI 北京互联中心(CNGI-6IX)以及 CERNET 香港互联中心(CERNET-HKIX), 分别设在北京和香港。CERNET 高速连接了中国科技网、中国电信、中国联通、中国移动以及国内其他互联网和下一代互联网试验网, 并与国际下一代互联网学术网, 包括美国 Internet2、欧洲 GEANT2 和亚太地区 APAN 等实现了高速互联。

### 4.2 国内互联情况

2013 年工信部同意在七大区域中心城市增设互联网骨干直连点, 2016 年,

CERNET 在各互联单位的帮助和配合下, 实现了互联互通带宽的增长和主干网流量的增加。截至 2016 年底, CERNET 国内互联互通带宽增长到 287Gb/s, 相比 2014 年增长了近 3 倍。其中, CERNET 至中国电信增长了 38Gb/s, 至中国联通增长了 20Gb/s, 至中国移动增长了 50Gb/s, 至中国科技网增长了 50Gb/s。

### 4.3 国际互联情况

自 1995 年以来, CERNET 就在北京设立唯一的国际出口, 与美国 Internet2、欧洲 GEANT、亚太地区 APAN/ 等学术网实现直接互联, 为教育和科研提供专用的国际通道。截至 2016 年底, CERNET 国际出口总带宽超过 65Gb/s。

从 2004 年开始, 清华大学通过国际竞标获得跨欧亚信息网络 TEIN 的运行管理权, 为东南亚、南亚等国家学术网与欧洲学术网互联提供跨洲际的网络连接运行服务, 支持欧亚国家之间开展教育和科研的国际合作。2016 年清华大学继续被指定为 TEIN 项目及其后续项目 Asi@connect 的直接参与方, 将一直负责 TEIN NOC 的运行, 并在策划和准备 Asi@connect NOC 的服务升级。

2015 年, 在刘延东副总理的见证下, CERNET 与欧洲泛欧学术网续签了 10 年的长期合作协议。

## 5 总结与展望

### 5.1 总结

综合来看, 2015 年和 2016 年是 CERNET 及 CNGI-CERNET2 稳定而蓬勃发展的两年。从表 2 中可以看到 CERNET 互联带宽、IPv4 地址、EDU.CN 域名、接入单位数量的对比变化。数据显示, CERNET 的国内互联带宽、接入单位数量等都呈现增长趋势。

表 2 CERNET 基础设施建设及应用状况

时 间	主干带宽 (Gb/s)	国内互联带宽 (Gb/s)	国际互联带宽 (Gb/s)	IPv4 地址 (万个)	EDU.CN 域名 (个)	接入单位 (个)
2014 年	10 ~ 100	90	65	1 459	4 321	3 000
2015 年	10 ~ 100	198	65	1 459	6 871	3 000
2016 年	10 ~ 100	287	65	1 459	6 937	3 200

从表 3 中可以看到, 2014—2016 年 CNGI-CERNET2 互联带宽、IPv6 地址数量、接入单位数量、用户数量的对比变化。数据显示, CERNET2 的接入单位持续增长, 成为国家打破 IPv6 发展僵局的重要示范网络基础设施, 为 CERNET2 二期项目做好准备。

表 3 CNGI-CERNET2 基础设施建设及应用状况

时 间	主干带宽 (Gb/s)	IPv6 地址 (条)	IPv6 BGP 前缀 (万条)	IPv6 自治域 (个)	接入单位 (个)	用户数量 (万)
2014 年	2.5 ~ 10	902	2.1	51	500	300
2015 年	2.5 ~ 10	1 000	2.8	51	600	400
2016 年	2.5 ~ 10	1 100	3.7	51	700	500

## 5.2 未来发展思路

当前世界经济在深度调整中曲折复苏，新一轮科技革命和产业变革蓄势待发，互联网作为国家战略性公共基础设施，已经成为信息技术与产业领域国际竞争的战略制高点。在国际发展竞争日趋激烈和我国发展动力转换的形势下，习近平总书记明确指出：“十三五”时期，中国将大力实施网络强国战略、国家大数据战略、“互联网+”行动计划，发展积极向上的网络文化，拓展网络经济空间，促进互联网和经济社会融合发展。为支撑实施“互联网+”行动计划，国家“十三五”规划明确指出，要“超前布局下一代互联网”。

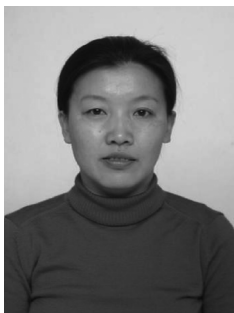
2012 年以来，随着 IPv4 地址分配完毕，全球进入 IPv6 下一代互联网的快速发展期。目前，美国、德国等发达国家的 IPv6 用户规模已经超过 20%，形成了完整的下一代互联网产业链，Google、Facebook 等著名互联网企业正在推动和引领全球的下一代互联网发展。相反，我国 IPv6 下一代互联网发展陷入僵局，IPv6 用户数量自 2012 年以来仍然维持在几百万的量级，与发达国家相比差距明显，造成这种局面的主要原因是：①缺乏商业驱动力，虽然运营商已将骨干网升级为双栈，但由于缺乏延伸到用户的 IPv6 基础设施和 IPv6 应用，没有明确的盈利模式，商业驱动力不足，IPv6 升级成本较高和存在 NAT 替代方案降低了电信运营商、互联网企业采用 IPv6 的积极性，手机、家庭网关、物联网设备等部分终端设备不能有效支持 IPv6，网络、终端、应用陷入循环等待状态，导致产业发展缓慢。②地方政府对 IPv6 缺乏认识。地方政府对 IPv6 的认识不到位，没有及时将 IPv6 与智慧城市建设中的各行各业应用进行有机结合。③可运营的 IPv4-IPv6 互通技术未有效推广应用。IPv4 与 IPv6 将长期共存，“十二五”期间，我国一直尝试多种 IPv4-IPv6 互通技术，但可规模化运营的 IPv4-IPv6 互通技术未能有效推广使用，导致现存海量 IPv4 终端用户无法畅通使用日益增长的 IPv6 应用，而日益增长的 IPv6 用户也无法使用现存海量的 IPv4 应用。④产业链协同发展的合力还未形成。下一代互联网产业链各环节缺乏统筹，没有形成合力。需要在国家主管部门的指导和支持下，发挥产业联盟等社会组织的统筹、推动和协调作用，更好地推动 IPv6 全产业链的发展。

打破 IPv6 发展僵局的有效办法是：在 IPv6 用户、IPv6 网络、IPv6 应用三个方面形成相辅相成的良性生态环境。有必要以高校群体建设并运行的核心网 CNGI-CERNET2/6IX 及保持的几百万 IPv6 用户为基础，建设大规模的 IPv6 示范网络，发展大规模用户，吸引国内著名互联网公司提供 IPv6 信息服务。在此示范作用下，带动我

国的网络运营商、信息服务商等企业共同推进下一代互联网发展，从而夯实“互联网+”的基础设施。

CERNET 将团结各高校，以实际行动落实习近平总书记对网络安全和信息化工作发表的系列讲话，抓住互联网体系结构核心技术“命门”，坚持互联网演进创新的技术路线，建设完成好 CERNET2 二期建设项目。为我国尽快打破 IPv6 发展僵局、超前布局下一代互联网起到示范先行作用，进一步引导应用和内容提供商采用 IPv6，带动网络运营商部署 IPv6，引领网络设备制造商突破核心技术，形成良性发展循环，促进尽快形成 IPv6 良性发展的生态环境。贯彻落实网络强国战略，加强自主创新，推广应用以及形成国际标准的下一代互联网关键技术，力争我国在网络空间国际竞争中取得更多的话语权。

### 作者简介



刘莹，清华大学网络科学与网络空间研究院副研究员。曾任中国计算机学会互联网专委会秘书长。主要研究方向是下一代互联网发展规划、网体系结构、组播路由算法研究、组播路由协议设计、高性能路由器体系结构。作为项目和课题负责人，承担和参加了多项国家省部级重点科研项目，包括 973 项目、国家 863 项目、国家自然科学基金项目、国家科技基础条件平台项目、国家科技支撑计划课题等。





## 后 记

为进一步推动我国科研信息化的发展，中国科学院（以下简称中科院）联合国家互联网信息办公室（以下简称国家网信办）、中华人民共和国教育部（以下简称教育部）、中华人民共和国科学技术部（以下简称科技部）、中国社会科学院（以下简称社科院）、国家自然科学基金委员会（以下简称基金委）和中国农业科学院（以下简称农科院）共同编撰出版了《中国科研信息化蓝皮书 2017》（以下简称蓝皮书）。本书是我国公开发行的专题阐述科研信息化的图书，旨在成为反映我国科研信息化发展态势的重要报告。

蓝皮书的编写工作得到了中科院、国家网信办、教育部、科技部、社科院、基金委和农科院有关领导的高度重视和大力支持。中科院白春礼院长亲自为蓝皮书作序。蓝皮书的具体编写工作也得到了国内外专家的积极支持和参与。来自中科院、社科院、农科院、清华大学、欧洲开放科学云基础设施处等科研院所和高校的国内外专家学者参与了编写工作。

此次蓝皮书编写工作的组织与协调由中科院网络安全和信息化工作领导小组负责，中科院计算机网络信息中心承担了具体组织工作。参加编写工作的各位专家学者兢兢业业、一丝不苟，加班加点完成了蓝皮书的编撰工作。在此，谨向所有参与、支持蓝皮书编撰工作，以及提出宝贵意见的各单位、领导、专家表示由衷的感谢！

在编写工作中，由于工作周期短、掌握资料不全等原因，可能无法反映中国科研信息化建设所有层面的工作与成效，特此致歉。同时，欢迎各界读者对蓝皮书提出宝贵意见和建议，不断提升其质量和影响力。我们希望通过持续发布“中国科研信息化蓝皮书”系列报告，不断推动我国科研信息化的发展，提升我国科技创新能力，为建设创新型国家贡献一份微薄力量。

《中国科研信息化蓝皮书 2017》编写委员会

2018 年 4 月 18 日

